Ein Lösungsverfahren für die integrierte Planung der Produktion in der Werkstattfertigung und den überbetrieblichen Transport

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing.

Christian Meinecke

Erstgutachter:	Prof. Dr. Jürgen Pannek
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Julia Bendul
Tag der mündlichen Prüfung:	19.04.2017

„Eine solche Arbeit ist eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen das Mögliche getan hat.“

Johann Wolfgang von Goethe

(über „Iphigenie auf Tauris“ am 16. März 1787 auf seiner italienischen Reise)

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH bzw. an der Universität Bremen. In dieser Zeit wurde die Idee zur Beschäftigung mit diesem Thema geboren und hat sich in einem sehr freien und kreativen Arbeitsumfeld zu der hier vorliegenden Dissertation entwickelt. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Erstgutachter Herrn Prof. Dr. Jürgen Pannek, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. Julia Bendul für die Übernahme der Zweitgutachterschaft.

Nicht nur den Gutachtern soll an dieser Stelle gedankt sein. Einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit haben auch meine Kollegen am BIBA, mit denen ich in dieser Zeit im wissenschaftlichen Austausch stand. Ihre inhaltliche Kritik sowie die verschiedenen Blickwinkel eröffneten mir wiederum neue Perspektiven und schlagen sich ebenfalls in dieser Arbeit nieder. Aber nicht nur fachlich stand ich mit meinen Kollegen im Austausch. Sie sorgten in unterschiedlich starkem Maße auch für eine gesunde Ablenkung. Außerdem hatten sie immer ein offenes Ohr, wenn es darum ging, die für eine solche Arbeit erforderliche Motivation auch in schwierigen Phasen aufrecht zu erhalten, den Fokus nicht zu verlieren und die notwendigen Fragen zu klären. Weiterhin möchte ich mich bei denen bedanken, denen ich im alltäglichen Leben nie begegnet bin, die aber durch ihre veröffentlichten Erkenntnisse einen wichtigen inhaltlichen Beitrag geleistet und somit indirekt an dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Meinen Freunden, meinen Eltern und Schwiegereltern möchte ich ebenfalls danken. Sie alle haben sich immer nach dem Stand der Arbeit erkundigt und damit indirekt einen gewissen Druck erzeugt, der notwendig ist, um auch in schwierigen Momenten weiterzumachen. Durch die Abgabe dieser Arbeit kann ich nun antworten: Die Arbeit ist fertig. Es ist geschafft!

Das Wichtigste zum Schluss: Ich möchte mich bei meiner Ehefrau Anika für all die grundlegenden und aufbauenden Gespräche bedanken, die diese Arbeit und alles, was damit zusammenhängt, zum Inhalt hatten. Durch Deinen Rückhalt und Deine Unterstützung wurde dieses langjährige Projekt überhaupt erst durchführbar. Unseren Töchtern Yara und Enie, die während dieser Zeit das Licht der Welt erblickt haben, möchte ich ebenfalls danken. Durch Euch habe ich eine neue Welt kennengelernt, die meinen Horizont Tag und Nacht erweitert, mich auf andere Gedanken gebracht und vieles in ein neues Licht gerückt hat. Ich bin froh und stolz, Teil dieser Familie zu sein, die mir während dieser Zeit so viel gegeben hat. Danke für Alles!

Zusammenfassung

Die Wettbewerbssituation auf den globalen Märkten zwingt Unternehmen zu einer Fokussierung auf die eigenen Kernkompetenzen und die Zusammenarbeit mit spezialisierten Partnern in einer Supply Chain (SC). Durch die unterschiedlichen und häufig konträren Ziele dieser Partner werden Prozesse unternehmensintern optimiert. Dadurch entsteht aus übergeordneter Sicht kein ideales Planungsergebnis für die gesamte Lieferkette. Mit Hilfe der integrierten Planung als Instrument des Supply Chain Management ist es möglich, eine unternehmensübergreifende Verbesserung im Sinne der Ziele der gesamten Lieferkette zu erreichen.

In dieser Arbeit wird auf die integrierte Planung von Produktion und des sich daran anschließenden überbetrieblichen Transports zu verschiedenen Zielen fokussiert. Die methodische Unterstützung zur Lösung dieses integrierten Planungsproblems ist bisher nicht ausreichend, da die vorhandenen Lösungsverfahren in der Mehrzahl produktions- oder transportorientierte Planungsansätze mit einer geringen Integration der beiden Teilprobleme verfolgen. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit bestand daher in der Entwicklung und Bewertung eines Lösungsverfahrens für dieses integrierte Planungsproblem, das eine hohe Lösungsqualität sowie eine hohe Integration der beiden Teilprobleme aufweist.

Durch eine intensive Analyse des aktuellen Standes auf dem Gebiet der integrierten Planung von Produktion und Transport konnten weitere Defizite auf diesem Gebiet festgestellt werden. Auf Grund dessen wurden neben dem übergeordneten Ziel dieser Arbeit weitere Teilziele definiert, um die identifizierten Lücken zu schließen. So wurde zusätzlich ein Zielsystem für die integrierte Planung sowie ein Repräsentationsschema zur Klassifizierung integrierter Planungsmodelle entwickelt. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die bisher vorhandenen integrierten Lösungsverfahren in der Regel jeweils ein eigens entwickeltes Planungsmodell verwenden, was eine Vergleichbarkeit untereinander verhindert. Aus diesem Grund bestand ein weiteres Teilziel in der Entwicklung eines Standardmodells, anhand dessen das hier entwickelte Lösungsverfahren evaluiert und hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit bewertet und bezüglich der Stabilität der Lösungen untersucht werden konnte.

Das hier vorgestellte Lösungsverfahren basiert auf einem ebenfalls in dieser Arbeit entwickelten Framework, das durch eine mehrstufige Dekomposition und Integration der Teilprobleme Produktions- und Transportplanung gekennzeichnet ist. Das Lösungsverfahren beruht auf einer neuen Strukturierung des gesamten Planungsprozesses und greift dennoch zur Lösung der Teilprobleme auf bekannte Methoden zurück. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit des entwickelten Lösungsverfahren wurde an einem praxisorientierten Szenario durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Evaluation zeigen, dass die Gesamtkosten der durch die Vergleichsverfahren ermittelten Gesamtplanungsergebnisse um bis zu 26% über denen des hier entwickelten Lösungsverfahrens liegen. Darüber hinaus konnte in einer Sensitivitätsanalyse nachgewiesen werden, das der Einsatz dieses Lösungsverfahren in einem breiten Kostenspektrum vorteilhaft ist. Durch die Konstruktion und die Vorgehensweise des Framework wird darüber hinaus eine hohe Flexibilität hinsichtlich der eingesetzten Methoden und somit eine einfache Übertragbarkeit auf ähnliche Problemstellungen sichergestellt.

Abstract

Companies are forced to concentrate on their core competencies and a close collaboration with specialized partners in a supply chain due to the competitive situation on global markets. These partners often have different and conflictive goals. Thus, there is only an internal process optimisation and not an optimised planning result for the entire supply chain. Integrated planning is a supply chain management concept which enables a supply chain wide optimisation to reach the overall goals.

The focus of this thesis is the integrated production and outbound distribution planning problem. Most of the existing planning methods in this research field are production or distribution oriented with a low integration level of these two sub-problems. There is a need for conceptual and methodological support for solving this integrated planning problem. Thus, the overall objective of this thesis was the development of a new integrated planning method for the focused part of the supply chain with a high integration of sub-problems and an improved performance.

As a result of an intense analysis of the state of the art it can be stated that there are several gaps in the field of integrated planning of production and outbound distribution. Consequently, a number of secondary objectives were defined in order to fill the identified gaps. Two of these secondary objectives were the development of a system of objectives and the development of a representation scheme for classification of existing planning models for the integrated problem considered. Furthermore, it turned out that each of the existing solution methods uses an individual planning model. This prevents a comparison of accuracy and performance between different solution methods. Therefore, another secondary objective was the development of a unified planning model, which was further used for evaluation regarding performance and stability of planning results.

The developed integrated planning method is based on a framework, which was also developed in this thesis. The main characteristics of the framework is a multi-stage decomposition and integration procedure of the sub-problems production and distribution scheduling. The integrated planning method applies this new multi-stage structure for the problem solving process and uses already known solution methods to solve the respective sub-problems. A real world oriented scenario was used to demonstrate the performance of the developed method. The evaluation shows that the overall costs of planning results generated by solution methods are up to 26% higher than the overall costs of the planning results generated by the developed integrated solution method. Furthermore, in a sensitivity analysis was shown that there is a positive impact on overall costs applying the integrated solution method developed within a wide range of cost parameters. Moreover, the general working principle of the frameworks shows a high flexibility regarding the solution methods to be defined and thus a simple transferability and application in a specific scenario in the field of integrated planning of production and outbound distribution.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung V

Zusammenfassung VII

Abstract IX

Inhaltsverzeichnis XI

Abbildungsverzeichnis XV

Abkürzungsverzeichnis XIX

Symbolverzeichnis XXI

1 Einleitung 1

1.1 Einführung in die Thematik 1

1.2 Problemstellung 5

1.3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise 6

1.4 Aufbau der Arbeit 8

2 Teilproblem: Produktionsplanung in der Werkstattfertigung 11

2.1 Grundlagen der Produktionsplanung 11

2.1.1 Planung und Zielsystem im Kontext der Produktion 11

2.1.2 Einordnung der Produktionsplanung in das Produktionsmanagement 12

2.1.3 Charakterisierung von Produktionssystemen 13

2.1.4 Dynamik und Determiniertheit bei der Produktionsplanung 15

2.1.5 Klassifikation von Planungsmodellen der Produktionsplanung 16

2.2 Das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung 17

2.3 Überblick über Lösungsverfahren 19

2.4 Ausgewählte Lösungsverfahren der Produktionsplanung 22

2.4.1 Prioritätsregel Earliest Due Date (EDD) 23

2.4.2 Prioritätsregel PT+WINQ+SL 23

3 Teilproblem: Transportplanung 25

3.1 Grundlagen der Transportplanung 25

3.1.1 Planung und Zielsystem im Kontext des Transports 25

3.1.2 Einordnung der Transportplanung in die Logistik 26

3.1.3 Dynamik und Determiniertheit bei der Transportplanung 27

3.1.4 Klassifikation von Planungsmodellen der Transportplanung 28

3.2 Das Standardproblem der Transportplanung 29

3.3 Überblick über Lösungsverfahren 30

3.4 Ausgewählte Lösungsverfahren der Transportplanung 33

3.4.1 Savings-Verfahren ... 34
3.4.2 Sweep-Verfahren ... 36
3.4.3 2-opt-Verfahren ... 38
3.4.4 3-opt-Verfahren ... 39
4 Das integrierte Planungsproblem ... 41
4.1 Grundlagen des IPODS ... 41
4.1.1 Definition des Problems der integrierten Planung ... 41
4.1.2 Begriffsbestimmung und Einordnung der integrierten Planung in das SCM ... 42
4.1.3 Abgrenzung zu ähnlichen SCM-Instrumenten ... 47
4.1.4 Zielsystem , Zielkonflikte und Verbesserungspotenzial der integrierten Planung ... 48
4.1.5 Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle ... 51
4.1.6 Klassifikation integrierter Planungsmodelle ... 55
4.2 Das Standardproblem der integrierten Planung ... 58
4.3 Überblick über Lösungsverfahren ... 64
4.4 Ausgewählte Lösungsverfahren des IPODS ... 68
4.4.1 Integration über die Planungsrichtung: Pull-Prinzip ... 68
4.4.2 Integration über die Planungsrichtung: Push-Prinzip ... 69
4.4.3 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chandra und Fisher (1994) ... 69
4.4.4 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Fumero und Vercellis (1999) ... 70
4.4.5 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chang und Lee (2004) ... 70
4.4.6 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Li et al. (2005a) ... 71
4.4.7 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chen und Vairaktarakis (2005) ... 71
4.4.8 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Li und Vairaktarakis (2007) ... 72
4.4.9 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Boudia und Prins (2009) ... 72
4.4.10 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Ullrich (2013) ... 73
4.4.11 Zusammenfassung ... 74
5 Integriertes Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration ... 75
5.1 Framework für Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration ... 75
5.1.1 Klassifikation ... 77
5.1.2 Dekomposition ... 77
5.2 Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration ... 78
6 Evaluation des entwickelten MSDI-Lösungsverfahrens ... 83
6.1 Evaluationsszenario ... 83
6.2 Aufbau der Simulationsstudie und Experimental Setup ... 85
6.3 Vergleichsverfahren ... 91

6.3.1 Push - EDD ... 92
6.3.2 Push - PT+WINQ+SL ... 92
6.3.3 Pull - Savings ... 92
6.4 Evaluationskriterien ... 93
6.5 Verifikation, Validierung und Implementierung ... 95
6.5.1 Verifikation ... 95
6.5.2 Validierung ... 95
6.5.3 Verwendete Methoden zur Verifikation und Validierung ... 95
6.5.4 Implementierung verwendeter Verfahren und deren Validierung ... 97
6.6 Ergebnisse und Interpretation ... 103
6.6.1 Variante 1: 80% Auslastung der Produktionskapazitäten ... 103
6.6.2 Variante 2: 85% Auslastung der Produktionskapazitäten ... 108
6.6.3 Variante 3: 90% Auslastung der Produktionskapazitäten ... 113
6.6.4 Variante 4: 95% Auslastung der Produktionskapazitäten ... 118
6.6.5 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse ... 124
6.6.6 Sensitivitätsanalyse ... 130
6.6.7 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse ... 131
7 Zusammenfassung, kritische Betrachtung und Ausblick ... 135
Literaturverzeichnis ... 139
Anhang 1 - Ablaufdiagramm des sequenziellen Savings-Algorithmus ... 163
Anhang 2 - Ablaufdiagramm des Sweep-Verfahrens ... 165
Anhang 3 - Ausprägungen der Parameter von Produktionsplanungsmodellen ... 167
Anhang 4 - Ausprägungen der Parameter von Transportplanungsmodellen ... 169
Anhang 5 - Ausprägungen der Parameter integrierter Planungsmodelle ... 173
Anhang 6 - Übersicht über die Ergebnisse der Simulationsstudie ... 175

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thematische Einordnung in die Supply Chain Planning Matrix 2
Abbildung 2: Vorgehensweise in der Arbeit und deren Teilziele 7
Abbildung 3: Zielsystem der Produktionsplanung 12
Abbildung 4: Funktionale Einordnung der Produktionsplanung 13
Abbildung 5: Einordnung der Werkstattfertigung in die Typisierung von Produktionssystemen 15
Abbildung 6: Überblick über Modellparameter von Produktionsplanungsmodellen 17
Abbildung 7: Strukturierung von Verfahren zur Lösung von Produktionsplanungsproblemen 20
Abbildung 8: Zielsystem der Transportplanung 26
Abbildung 9: Einordnung der Transportplanung in die Logistik 27
Abbildung 10: Überblick über Modellparameter von Transportplanungsmodellen 29
Abbildung 11: Strukturierung von Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen 31
Abbildung 12 : Grundidee zur Berechnung der Savings-Werte 35
Abbildung 13: Schematischer Ablauf der Tourenbildung im Savings-Verfahren 36
Abbildung 14: Schematischer Ablauf der Tourenbildung im Sweep-Verfahren 37
Abbildung 15: Tourenpläne mit unterschiedlicher Lage des Depots 38
Abbildung 16: Grundidee des 2-opt-Verfahrens 39
Abbildung 17: Grundidee des 3-opt-Verfahrens 40
Abbildung 18: Evolution von Unternehmensbeziehungen und deren Merkmale 44
Abbildung 19: Einordnung des Instruments der integrierten Planung in das SCM 46
Abbildung 20: Zielsystem der integrierten Planung 49
Abbildung 21: Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle 52
Abbildung 22: Detaillierung der Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsverfahren 53
Abbildung 23: Klassifikation integrierter Produktions- und Transportplanungsmodelle 57
Abbildung 24: Strukturierung von Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems 65
Abbildung 25: Framework für Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration .. 75
Abbildung 26: Teilergebnisse und Benchmarks der Startlösung im Planungsschritt 79
Abbildung 27: Ablauf und Ergebnisse im ersten Integrationsschritt 81
Abbildung 28: Teilszenario Produktion 84
Abbildung 29: Teilszenario Distribution 85
Abbildung 30: Ablaufdiagramm des MSDI-Lösungsverfahrens 102
Abbildung 31: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 1 103
Abbildung 32: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 1 104
Abbildung 33: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 1 104

Abbildung 34: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 1 105
Abbildung 35: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 1..... 106
Abbildung 36: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 1 .. 107
Abbildung 37: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 1..... 108
Abbildung 38: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 2 109
Abbildung 39: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 2..... 109
Abbildung 40: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 2..... 110
Abbildung 41: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 2 110
Abbildung 42: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 2..... 111
Abbildung 43: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 2 .. 112
Abbildung 44: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 2..... 113
Abbildung 45: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 3 114
Abbildung 46: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 3..... 114
Abbildung 47: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 3..... 115
Abbildung 48: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 3 115
Abbildung 49: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 3..... 116
Abbildung 50: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 3 .. 117
Abbildung 51: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 3..... 118
Abbildung 52: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 4 119
Abbildung 53: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 4..... 119
Abbildung 54: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 4..... 120
Abbildung 55: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 4 121
Abbildung 56: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 4..... 122
Abbildung 57: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 4 .. 123
Abbildung 58: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 4..... 124
Abbildung 59: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in den einzelnen Varianten 125
Abbildung 60: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten der Warteschlange 126
Abbildung 61: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten des Zwischenspeichers 127
Abbildung 62: Vergleich der durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion..... 128
Abbildung 63: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports 129
Abbildung 64: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise 129
Abbildung 65: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse bei 90%iger Auslastung 130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung von Aufgaben zu den Werkstätten 84
Tabelle 2: Daten eines Auftragstupels 86
Tabelle 3: Bearbeitungszeiten 88
Tabelle 4: Produktspezifischer Arbeitsumfang 89
Tabelle 5: Entfernungsmatrix im Teilszenario Transport 90
Tabelle 6: Ergebnisse der Validierung des implementierten Savings-Verfahrens 99
Tabelle 7: Ergebnisse der Validierung des implementierten Sweep-Verfahrens 100
Tabelle 8: Ergebnisse der Validierung des implementierten 2-opt-Verfahrens 100
Tabelle 9: Verursachte Mehrkosten gegenüber dem besten Verfahren 131
Tabelle 10: Vergleichende Bewertung der untersuchten Lösungsverfahren 132

Abkürzungsverzeichnis

aGP	alternatives Gesamtplanungsergebnis
aPP	alternativer Produktionsplan
aTP	alternativer Transportplan
CP	Collaborative Planning
COVERT	Cost Over Time
CPFR	Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
ECR	Efficient Consumer Response
EDD	Earliest Due Date
EE	Entfernungseinheit
GE	Geldeinheiten
GP	Gesamtplanungsergebnis
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IP	Integrierte Planung
IPODS	Integrated Production and Distribution Scheduling Problem
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
JSSP	Job Shop Scheduling Problem
MSDI	MehrStufige Dekomposition und Integration (engl.: multi step decomposition and integration)
NP	Nicht Polynomial
OEM	Original Equipment Manufacturer
oG	obere Grenze
PDP	Production Distribution Problem
PIDRP	Production Inventory Distribution Routing Problem
PP	Produktionsplanung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PT	Processing Time
PTSP	Production and Transportation Scheduling Problem
SC	Supply Chain
SCC	Supply Chain Collaboration
SCI	Supply Chain Integration
SCM	Supply Chain Management
SCP	Supply Chain Planning

SCS	Supply Chain Scheduling
SL	Slack
SPT	shortest processing time first
TSP	Travelling Salesman Problem
TP	Transportplanung
TWK	Total Work Content
uG	untere Grenze
VMI	Vendor Managed Inventory
VRP	Vehicle Routing Problem
WINQ	Work in Next Queue
ZE	Zeiteinheiten

Symbolverzeichnis

Klassifikation von Planungsmodellen

α	Maschinenkonfiguration
α_1	Anordnung der Maschinen
α_2	Anzahl der Maschinen
β	Auftragsparameter
β_1	Unterbrechung der Auftragsbearbeitung
β_2	Kapazitätsbeschränkungen
β_3	Zuordnung von Prioritäten zu Bearbeitungsaufträgen
β_4	identisches Freigabedatum
β_5	konstante Obergrenze der Maschinenanzahl
β_6	Bearbeitungszeiten die einzelnen Operationen auf den Maschinen
β_7	Liefertermin
β_8	Maschinenverfügbarkeit
β_9	Fixe Produktionskosten
β_{10}	Variable Produktionskosten
β_{11}	Rüstkosten
β_{12}	Strafkosten für Verspätungen
γ	Zielfunktion
π	Lieferparameter
δ	Kundenanzahl
TS	Zwischenspeicher
TS1	Kapazitätsbeschränkung des Zwischenspeichers
TS2	Beschränkung der Speicherdauer
TS3	Lagerkosten
NW	Netzwerk
NW1	Anzahl der Knoten
NW2	Anzahl der Depots
NW3	Anzahl der Quellen
NW4	Kantenorientierung
NW5	Anzahl der Distributionsebenen
SP	Szenario Parameter
SP1	Aufteilung einer Sendung

SP2	Zeitfenster
SP3	Planungshorizont
SP4	Anzahl der Transportfahrzeuge
SP5	Kapazitätsbeschränkung der Transportfahrzeuge
SP6	Homogenität der Transportfahrzeuge
SP7	Auftragsgröße
SP8	Wartezeiten
SP9	Transportzeiten
SP10	Liefermethoden
SP11	Fixe Transportkosten
SP12	Variable Transportkosten
SP13	Strafkosten für Verspätungen

Produktionsplanung

J	Menge aller Jobs mit $J = \{J_i\}_{i=1}^{j}$
M	Menge aller Maschinen mit $M = \{M_l\}_{l=1}^{m}$
O_i	Menge aller Operation eines Jobs i mit $O_i = \{O_{ik}\}_{k=1}^{oi}$
oi	Anzahl der Operationen eines Jobs i
O_l	Operation, die auf der Maschine l ausgeführt wird
P	Gesamtanzahl aller Operationen mit $P = \sum_{i=1}^{j} oi$
p_{ikl}	Bearbeitungszeit einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine l
$\bar{p}_t$	durchschnittliche Bearbeitungszeit
u	Auslastung (utilization)
λ	mittlere Ankunftsrate
t_{ikl}	Startzeitpunkt der Bearbeitung einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine l
$C_{\max}^{prod}$	Durchlaufzeit (makespan) der Produktion
E_l	Menge an Operationen, die nicht zu einem Job gehören aber auf der Maschine l ausgeführt werden
TWK_i	Fälligkeitstermin eines Jobs i (due date) berechnet nach der TWK-Methode
r_i	Freigabezeitpunkt des Jobs i (release date)
PI_i^t	Prioritätswert eines Jobs i zum Zeitpunkt t
dd_i	Fälligkeitstermin eines Jobs i (due date)

WT_{il+1}	geschätzte Wartezeit der Operation eines Jobs i auf der nächsten Maschine $l+1$
$SL_{iO_i}(t)$	slack eines Jobs i vor der Operation O_i zum Zeitpunkt t
k	Skalarfaktor zur Bestimmung der Gewichtung eines Auftrags bei der ATC Regel
v_i	Verspätungskosten eines Jobs i für jede verspätete Zeiteinheit
p	durchschnittliche Prozesszeit aller wartenden Jobs

Transportplanung

V	Knotenmenge eines Distributionsnetzes
E	Kantenmenge eines Distributionsnetzes
H	Menge der Verbraucher eines Transportgraphen mit $N=\{1,\ 2,\ \ldots,\ \mathrm{n}\}$
e, f	nacheinander folgende Knoten mit $e, f \in H=\{1,2,\ldots,h\}$
d_e	Nachfragemenge des Knoten e
v	Anzahl identischer Transportfahrzeuge $v \geq 1$
$\kappa_{\max}^{transp}$	maximale Kapazität der Transportfahrzeuge
c_{ef}	Transportkosten vom Knoten e zum Knoten f mit $c_{ef} \geq 0$
a_{ef}	binäre Zuordnungsvariable, die ausdrückt, dass die Kante zwischen dem Knoten e und dem Knoten f genau ein Mal genutzt wird und damit Zuordnung von Knoten zu einer Tour
b_e	Beladung eines in e ankommenden Transportmittels

Transportplanung: Savings-Verfahren

d_{0j}	Entfernung vom Depot 0 zum Knoten j mit $d_{0j} \geq 0$
d_{i0}	Entfernung vom Knoten i zum Depot 0 mit $d_{i0} \geq 0$
d_{ij}	Entfernung vom Knoten i zum Knoten j mit $d_{ij} \geq 0$
s_{ij}	Savingswert für das Knotenpaar i und j

Standardproblem der integrierten Planung (Änderungen und Erweiterungen) der obigen Standardprobleme

c^{prod}	Gesamtproduktionskosten
$c^{prodfix}$	gesamte Fixkosten der Produktion
$c_{il}^{prodfix}$	Fixkosten der Produktion eines Jobs i auf der Maschine l
$c^{prod\,var}$	gesamte variable Kosten der Produktion

$c_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}$	variable Kosten der Bearbeitung einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine l
$a_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}$	binäre Zuordnungsvariable, die ausgedrückt, ob durch die Bearbeitung einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine l variable Produktionskosten entstehen
$c^{prodset}$	gesamte Rüstkosten der Produktion
$c_{ikl}^{prodset}$	Rüstkosten für die Bearbeitung einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine k
$a_{ikl}^{prodset}$	binäre Zuordnungsvariable, die ausgedrückt, ob durch die Bearbeitung einer Operation k eines Jobs i auf der Maschine l Rüstkosten entstehen
$c^{prodpen}$	gesamte Kosten für verspätete Fertigstellung der Aufträge (Penalty) (Produktionsanteil)
$c_i^{prodpen}$	Kosten für verspätete Fertigstellung eines Jobs i (Produktionsanteil)
$a_i^{prodpen}$	binäre Zuordnungsvariable, die ausgedrückt, ob ein Job i verspätet fertiggestellt wurde (Produktionsanteil)
$\kappa_{\max}^{tstor}$	maximale Kapazität des Zwischenspeichers (temporary storage)
c^{tstor}	Gesamtkosten für die Nutzung des Zwischenspeichers
c_i^{tstor}	Kosten für die Nutzung des Zwischenspeichers durch den Job i
si_t	Lagerbestand der aktuellen Periode (storage inventory of period t)
si_{t-1}	Lagerbestand der vorangegangenen Periode
si_t^+	Lagerzugänge der aktuellen Periode
si_t^-	Lagerabgänge der aktuellen Periode
a_i^{tstor}	binären Zuordnungsvariable, die ausgedrückt, ob der Job i den Zwischenspeicher genutzt hat
T	Menge aller Touren mit $\mathrm{T}=\{\mathrm{T}_v\}_{v=1}^{q}$
c^{transp}	Gesamttransportkosten
$c^{transpfix}$	gesamte Fixkosten des Transports
$c_{T_v}^{transpfix}$	Fixkosten bei Durchführung der Tour T_v
$c^{transp\,\mathrm{var}}$	gesamte variable Kosten des Transports
$c_{ef}^{transp\,\mathrm{var}}$	variable Transportkosten vom Knoten e zum Knoten f mit $c_{ef}^{transp\,\mathrm{var}} \geq 0$
$c^{transppen}$	gesamte Kosten für verspätete Fertigstellung der Aufträge (Penalty) (Transportanteil)
$c_f^{transppen}$	Kosten für verspätete Belieferung des Knotens f (Transportanteil)
A_{T_v}	binäre Zuordnungsvariable, die ausdrückt, ob eine Tour T_v durchgeführt wurde
B_f	binäre Zuordnungsvariable, die beschreibt, ob eine Lieferung verspätet in f eintrifft und ob folglich Strafkosten entstehen

$A_{T_v}^{i}$	binäre Zuordnungsvariable, die ausdrückt, ob ein Job i einer Tour T_v gehört
$C_{\max_i}^{prod}$	Durchlaufzeit (makespan) eines Jobs i durch die Produktion
t_v^i	Startzeitpunkt der Tour T_v, die den Job i enthält

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Unternehmen sind wegen der stetig wachsenden Konkurrenz und des steigenden Kostendrucks auf den globalisierten Märkten gezwungen, ihre Abläufe zu optimieren, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Dabei sehen sich die Unternehmen mit Herausforderungen wie immer kürzeren Lieferzeiten und einer stetig wachsenden Produktvielfalt sowie einer hohen Volatilität der Märkte konfrontiert [Becker und Schütte, 2004]. Weitere Herausforderungen für Unternehmen sind verkürzte Produktlebenszyklen sowie der zunehmend stärker werdende Wunsch der Kunden nach individualisierten Produkten (vgl. [Arndt, 2013] und [Riedel und Müller, 2006]). Auf diese Veränderungen der Wettbewerbssituation reagieren die Unternehmen mit einer Konzentration auf die eigenen Kernkompetenzen. Teilprozesse, die nicht zur Kernkompetenz eines Unternehmens gehören, werden in darauf spezialisierte Unternehmen ausgelagert [Arndt, 2013]. Durch die damit verbundene Übertragung von Verantwortlichkeiten auf weitere Unternehmen werden mehr oder weniger enge Beziehungen zu diesen Unternehmen eingegangen und bestehende Lieferketten (Supply Chain (SC)) erweitert. Als Folge dieser Entwicklung ist eine immer stärker werdende Verflechtung von Produktionsprozessen und Organisationseinheiten zwischen den involvierten Unternehmen entstanden. Diese Verflechtungen erfordern wiederum einen erhöhten Koordinations- und Kooperationsbedarf zwischen den einzelnen Unternehmen innerhalb der Lieferkette [Arnold et al., 2008]. Deshalb ist die effiziente Koordination eines solchen Unternehmensnetzwerks zu einem erfolgskritischen Faktor geworden [Ruiz-Torres und Tyworth, 1997]. Von den Kunden wird die gesamte Lieferkette als eine Organisationseinheit wahrgenommen [Hertel et al., 2011]. Dies hat zur Folge, dass sich der bisher bestehende Wettbewerb zwischen einzelnen Unternehmen zu einem Wettbewerb zwischen ganzen Lieferketten entwickelt hat (vgl. [Wiendahl und Lutz, 2002] und [Wildemann, 2005]). Damit stellt die Fähigkeit des erfolgreichen Managements der gesamten Lieferkette einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil dar [Eksioglu, 2002], der für den technologischen und wirtschaftlichen Erfolg der Supply Chain ausschlaggebend ist.

Zur Bewältigung der beschriebenen Herausforderungen wurden verschiedene Ansätze wie beispielsweise das Supply Chain Management (SCM) entwickelt. Das Supply Chain Management vereint verschiedene Aspekte der Betrachtung einer Lieferkette mit dem Ziel der ganzheitlichen Gestaltung der gesamten Supply Chain sowie der Planung und Steuerung des darin ablaufenden Waren- und Informationsflusses [Arnold et al., 2008]. Um dieses Ziel zu erreichen, ist folglich eine unternehmensübergreifende Betrachtung und Optimierung der gesamten Lieferkette notwendig [Baumgarten und Darkow, 2004]. Die Bemühungen der einzelnen Unternehmen zur Planung und Optimierung der Prozesse dürfen sich nicht mehr nur auf das eigene Aufgabengebiet erstrecken. In einer Situation, in der ganze Lieferketten im Wettbewerb miteinander stehen und deren Akteure als Lieferanten und Kunden innerhalb einer Lieferkette verstanden werden, ist eine unternehmensübergreifende Betrachtung der Planungsprozesse unumgänglich [Zäpfel und Wasner, 2000]. Die Kosten-, Zeit- und Qualitätsziele der gesamten Lieferkette müssen im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen und sich am Nutzen für den Endkunden orientieren [Pfohl, 2000]. Der Logistik als verbindendes Element kommt bei einer übergreifenden Betrachtung eine besondere Rolle zu. Die Abstimmung logistischer Aktivitäten über die gesamte Lieferkette ist wesentlich für das Erreichen einer effizienten Logistikleistung [Lee et al., 2008]. Dazu müssen sowohl die Prozesse und deren

Anforderungen als auch die Planungsergebnisse der einzelnen Partner in einer unternehmensübergreifenden Betrachtung berücksichtigt werden.

Die konsequente Ausrichtung der Planungsaktivitäten auf das Wohl der gesamten Lieferkette mündet in der integrierten Planung (IP). Dabei werden bisher einzeln und sequenziell betrachtete Planungsprobleme zusammengeführt und gleichzeitig untersucht. Das integrierte Planungsproblem besteht somit aus mindestens zwei Teilproblemen. Dadurch entsteht ein Optimierungsproblem, bei dem Anforderungen und Entscheidungen verschiedener Funktionsbereiche als Entscheidungsvariablen oder Restriktionen definiert und simultan betrachtet werden (vgl. [Sarmiento und Nagi, 1999] und [Chen, 2010]). Die integrierte Planung kann sich je nach Schwerpunkt der Betrachtungen auf vielfältige Aufgabenbereiche erstrecken. In dieser Arbeit werden auf operativer Ebene die Teilprobleme Produktionsplanung und die überbetriebliche Transportplanung in einem integrierten Planungsproblem zusammengeführt. Zur thematischen Einordnung dieser Arbeit in die Supply Chain Planning Matrix in Anlehnung an Rohde et al. (2000) sowie Corsten und Gössinger (2002) dient die Abbildung 1. Der hinterlegte und markierte Bereich in dieser Abbildung grenzt den Untersuchungsbereich dieser Arbeit gegenüber anderen Aufgabenbereichen ab.

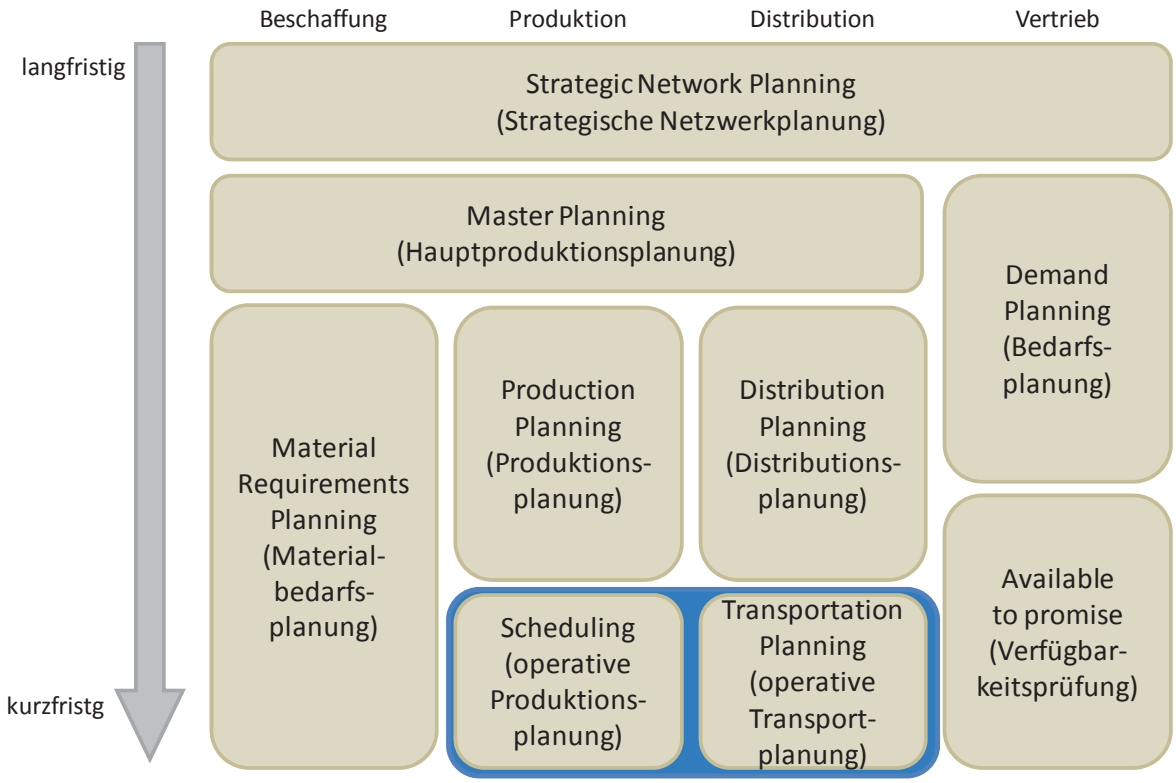


Abbildung 1: Thematische Einordnung in die Supply Chain Planning Matrix

Die integrierte Planung stellt eines der unternehmensübergreifenden Konzepte zur Planung und Optimierung von Prozessen im Rahmen des SCM dar. Wie alle unternehmensübergreifenden Konzepte beruht auch die integrierte Planung auf dem Gedanken der Zusammenarbeit. Letztere ist notwendig, damit die beteiligten Unternehmen in die Lage versetzt werden, gemeinsam Prozesse zu verändern und so beispielsweise auf veränderte Marktbedingungen reagieren zu können [Simatupang, et al., 2002]. Dabei bezieht sich die Zusammenarbeit auf gemeinsame

Planungsaktivitäten und den dafür notwendigen intensiven Austausch von Informationen zwischen den beteiligten Unternehmen. Der positive Einfluss des Informationsaustauschs auf die Kostensituation in einer Lieferkette wurde durch Studien nachgewiesen (vgl. [Clark et al., 2001], [Chen, 2003] und [Scholz-Reiter und Meinecke, 2011]). Der Informationsaustausch stellt die Grundlage für eine erfolgreiche Zusammenarbeit dar [Stadtler, 2005]. Durch die technologische Entwicklung erfolgt dieser Informationsaustausch zunehmend über webbasierte Lösungen, die auch für kollaborative Formen des Supply Chain Management eingesetzt werden (vgl. [Tan et al., 2000], [Scholz-Reiter et al., 2010b] und [Scholz-Reiter et al., 2011b]). Für einen intensiven Informationsaustausch bedarf es neben diesen technischen Voraussetzungen auch des notwendigen Maßes an Vertrauen [Gleißner und Femerling, 2008]. Wenn diese Voraussetzungen geschaffen wurden, kann ein entsprechender Informationsaustausch und die darauf aufbauende Zusammenarbeit stattfinden. Dennoch gilt es zu beachten, dass die involvierten Unternehmen trotz eines Informationsaustauschs und gemeinsamer Planungsaktivitäten als wirtschaftlich und rechtlich eigenständige Einheiten agieren und zum Teil gegensätzliche Ziele verfolgen [Chen und Hall, 2007]. Aus diesen unterschiedlichen Zielen entstehen im Zuge der integrierten Planung mit einer unternehmensübergreifenden Betrachtung Zielkonflikte, die es zu lösen gilt. Für die beiden in dieser Arbeit betrachteten Aufgabenbereiche der Produktionsplanung und der Transportplanung auf der operativen Ebene ergibt sich somit hinsichtlich der Planungsziele folgendes Bild: Die Ziele der Produktionsplanung bestehen in der Reduzierung der Rüstkosten, der Maximierung der Auslastung der vorhandenen Maschinen sowie in der Minimierung der Durchlaufzeit, wohingegen die Transportplanung auf eine Minimierung der Fracht- und Beladungskosten abzielt [Blumenfeld et al., 1991].

Durch eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Akteuren entstehen untereinander abgestimmte Planungsergebnisse. Dabei sind diese Planungsergebnisse zumeist das Ergebnis von Verhandlungen. Allerdings sind bei diesen Abstimmungsprozessen oftmals nicht alle beteiligten Unternehmen gleichberechtigt. Deren Verhandlungsmacht ergibt sich unter anderem in Abhängigkeit vom Kostenanteil, den die beteiligten Unternehmen zum Endprodukt beisteuern [Stadtler, 2009]. Wenn beispielsweise die Transportkosten nur einen Bruchteil der Gesamtkosten verursachen, wird sich die unternehmensübergreifende Planung sehr stark an den Anforderungen und Restriktionen der Produktion orientieren. Auf diese Weise führt die Verhandlungsmacht einzelner Akteure dazu, dass diese das Planungsergebnis entsprechend ihrer Planungsprämissen und damit zu ihren Gunsten beeinflussen. Als Folge dessen kann für die gesamte Lieferkette ein suboptimales Planungsergebnis vorliegen, bei dem vorhandene Potenziale nicht genutzt werden können. Im Gegensatz dazu kann bei einer annähernd ausgeglichenen Kostenstruktur die Verhandlungsmacht einzelner Unternehmen vernachlässigt werden. Dadurch rückt das eigentliche Ziel der gemeinsamen und integrierten Planung, ein für den gesamten Betrachtungsbereich gutes Planungsergebnis zu erhalten, in den Vordergrund. Deshalb wird in dieser Arbeit eine annähernd ausgeglichene Kostenstruktur zwischen den Teilproblemen Produktionsplanung und Transportplanung angenommen. Beispiele für eine solche ausgeglichene Kostenstruktur finden sich unter anderem bei der Herstellung von Düngemitteln und bei der Futtermittelproduktion [Boudia und Prins, 2009] sowie in der Nahrungsmittel- und Textilindustrie (vgl. [Chen und Vairaktarakis, 2005] und [Pundoor und Chen, 2005]).

Bei der Betrachtung des Teilproblems der Produktionsplanung ist die Form der Fertigungsorganisation zu beachten, da für die Produktionsplanung einer Werkstattfertigung andere Rahmenbedingungen vorliegen und deshalb auch andere Planungsmethoden zum Einsatz kommen

als beispielsweise bei der Baustellenfertigung [Jodlbauer, 2008]. In dieser Arbeit wird für das Teilproblem der Produktionsplanung die Organisationsform der Werkstattfertigung betrachtet. In der betrieblichen Praxis wird diese Form der Fertigungsorganisation auch mit anderen Organisationsformen wie der Fließfertigung und der Netzwerkfertigung vermischt [Gudehus, 2010]. Dennoch können auch diese Mischformen bei entsprechender Abstraktion als Werkstattfertigung betrachtet werden. Das Hauptmerkmal der Werkstattfertigung ist die organisatorische und räumliche Anordnung der Arbeitssysteme (z. B. Maschinen) nach dem Verrichtungsprinzip zu einer Einheit (vgl. [Dangelmaier, 2001] und [Pfohl, 2010]). Jedes logistische Objekt muss entsprechend den vorgesehenen Bearbeitungsaufträgen in den jeweiligen Werkstätten bearbeitet werden. Die Planungsaufgabe besteht nun darin, die zeitliche Zuordnung der Bearbeitungsaufträge zu den Bearbeitungsstationen so zu wählen, dass die Zielkriterien wie beispielsweise die Minimierung der Durchlaufzeit oder die Maximierung der Maschinenauslastung erfüllt werden [Schuh und Stich, 2012]. Damit stellt das Produktionsplanungsproblem in der Werkstattfertigung ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar, das NP-schwer ist (vgl. [Garey et al., 1976], [Lenstra et al., 1977] und [Lenstra und Rinnooy Kan, 1979]). Die Wahl dieser Form der Fertigungsorganisation ist dadurch begründet, dass diese vor dem Hintergrund einer vermehrten Individualisierung von Produkten wieder zunehmend an Bedeutung gewinnt (vgl. [Chen, 2004] und [Chen, 2010]). Eine kundenindividuelle Fertigung und Konfiguration von Produkten findet sich unter anderem in der Unterhaltungselektronik sowie in der Computerindustrie (vgl. [Li et al., 2005] und [Stecke und Zhao, 2007]), wo beispielsweise Laptops entsprechend der vom Kunden gewünschten Spezifikationen produziert werden. Weitere aktuelle Beispiele für eine kundenindividuelle Produktion finden sich in der Bekleidungs-, Nahrungsmittel- und Düngemittelindustrie (vgl. [Chen und Vairaktarakis, 2005] und [Pundoor und Chen, 2005]) sowie bei der technischen Modifikation importierter Neufahrzeuge auf einem Automobilterminal sowie (vgl. [Gottlieb et al., 2003], [Mattfeld, 2005], [Mattfeld, 2006] und [Scholz-Reiter et al., 2008]).

Durch die Konzentration auf die eigenen Kernkompetenzen werden zunehmend wertschöpfende Tätigkeiten auf die Partner in der Lieferkette übertragen. Als Folge dessen steigt die Menge der transportierten Güter zwischen den beteiligten Unternehmen innerhalb einer Lieferkette stark an. Daraus ergibt sich eine zunehmende Bedeutung der Transportplanung für den wirtschaftlichen Erfolg der gesamten Lieferkette. Dabei erstreckt sich der Betrachtungsbereich der Transportplanung sowohl auf langfristige als auch auf mittel - und kurzfristige Aufgaben. Auf strategischer Ebene übernimmt die Transportplanung die Gestaltung von Transportnetzen wohingegen die Planung der Transportwege und -mittel zu den Aufgaben auf taktischer Ebene zählen [Arnold et al., 2008]. Auf operativer Ebene befasst sich die Transportplanung mit der Zuordnung von Ressourcen (Transportmitteln) zu bestimmten Aufträgen (Transportaufträgen) [Grünert und Irnich, 2005] und wird daher auch als Tourenplanung bezeichnet. Auf Grund der in der Abbildung 1 dargestellten Einordnung des Themas fokussiert diese Arbeit auf die operative Ebene und damit auf die Tourenplanung. Im Folgenden werden die Begriffe Transportplanung und Tourenplanung synonym verwendet. In der Literatur wird das Standardproblem der Tourenplanung definiert, das als Referenzmodell bei der Untersuchung und dem Leistungsvergleich verschiedener Lösungsverfahren dient [Arnold et al., 2008]. Das Ziel der Tourenplanung besteht in der Minimierung der insgesamt zu fahrenden Strecke unter Beachtung verschiedener Nebenbedingungen wie beispielsweise Kapazitätsrestriktionen [Vahrenkamp et al., 2012]. Das Standardproblem der Tourenplanung besteht einerseits aus einem Zuordnungsproblem (welcher Knoten gehört zu welcher Tour) und anderseits aus einem Reihenfolgeproblem (in welcher Reihenfolge werden die Knoten innerhalb einer Tour

angefahren) [Wenger, 2010]. Damit zählt das Standardproblem der Tourenplanung zu den kombinatorischen Optimierungsproblemen und ist NP-schwer [Grünert und Irnich, 2005].

Durch die Zusammenführung der beiden Teilprobleme entsteht das integrierte Planungsproblem auf operativer Ebene, das im Fokus dieser Arbeit steht. Auf Grund der hohen Komplexität der beiden Teilprobleme ergibt sich für das integrierte Planungsproblem ebenfalls eine hohe Komplexität. Das integrierte Planungsproblem ist ebenfalls NP-schwer und zählt zu den kombinatorischen Optimierungsproblemen, das darüber hinaus eine multikriterielle Zielstellung verfolgt. Aus diesen Aspekten und unter Berücksichtigung der bisher existierenden Lösungsansätze ergibt sich die Problemstellung dieser Arbeit, die im Folgenden erläutert wird.

1.2 Problemstellung

In den letzten Jahrzehnten ist die Forschung zu den einzelnen Teilproblemen Produktionsplanung und Transportplanung bereits weit fortgeschritten. Die erzielten Forschungsergebnisse ermöglichen für jedes der Teilprobleme ein gutes Planungsergebnis. Allerdings ergibt sich durch den integrierten Planungsansatz weiteres Optimierungspotenzial, welches mit der bisherigen sequenziellen Betrachtungsweise der Teilprobleme nicht ausgeschöpft werden kann (vgl. [Glover et al., 1979], [Martin et al., 1993], [Chandra und Fisher, 1994], [Chang und Lee, 2003], [Pundoor und Chen, 2005] und [Bard und Nananukul, 2009]). Unter der sequenziellen Betrachtungsweise wird zunächst die Lösung eines Teilproblems und darauf aufbauend die Lösung des jeweils anderen Teilproblems verstanden. Dabei lassen sich zwei unterschiedliche Planungsrichtungen unterscheiden, die sich an der Richtung des Materialflusses orientieren. Bei der Vorwärtsplanung (Push-Prinzip) wird zunächst die Produktionsplanung betrachtet. Nachdem diese abgeschlossen ist, erfolgt auf Basis dieser Ergebnisse die Transportplanung. Bei der Rückwärtsplanung (Pull-Prinzip) wird folglich zuerst die Transportplanung durchgeführt und ausgehend von diesen Resultaten die Produktionsplanung nachgelagert betrachtet. Sowohl bei der Vorwärts- als auch bei der Rückwärtsplanung erhält somit das zuerst betrachtete Teilproblem eine umfassende Planungsfreiheit und determiniert über die ermittelten Planungsergebnisse Restriktionen für das jeweils nachgelagerte Teilproblem. Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse nach Abschluss des sequenziellen Planungsschritts kann durch eine anschließende Optimierung erreicht werden. Dabei werden in den meisten Fällen lokale Suchverfahren angewendet, die das bis dahin vorliegende Planungsergebnis auf mögliche Vertauschungen zur Verbesserung des Gesamtplanungsergebnisses untersuchen.

Die sequenzielle Betrachtungsweise stellt im Allgemeinen keine oder nur eine sehr geringe Integration im eigentlichen Sinn dar, da die Berücksichtigung von Anforderungen und Planungsprämissen nur einseitig erfolgt. Aus diesem Grund führt diese Betrachtungsweise zu suboptimalen Gesamtplanungsergebnissen, bei denen das Optimierungspotenzial der integrierten Betrachtungsweise nicht ausgeschöpft werden kann. Die simultane Betrachtung in einem Gesamtproblem erscheint als ein geeigneter Ausgangspunkt für die Entwicklung eines integrierten Lösungsverfahrens, bei dessen Anwendung das Gesamtplanungsergebnis verbessert werden kann. Diese Verbesserung kann erreicht werden, wenn eine sehr gute oder sogar die optimale Lösung des zuerst betrachteten Teilproblems zugunsten einer Verbesserung der Lösung des nachgelagerten Teilproblems verworfen wird, wodurch die Verschlechterung der ersten Lösung überkompensiert wird. Dieser Ansatz entspricht einer simultanen Berücksichtigung der Anforderungen und Restriktionen beider Teilprobleme bei der Lösungsfindung.

Folglich bedarf es einer neuen Strukturierung der Vorgehensweise zur Lösungsfindung, die eine starke Verzahnung der beiden Teilprobleme aufweist. Die Problemstellung besteht somit darin, ein Lösungsverfahren zu entwickeln, das nicht auf der oben beschriebenen sequenziellen Betrachtungsweise basiert und das durch die simultane Betrachtung der beiden Teilprobleme ein integriertes Gesamtplanungsergebnis ermitteln kann. Ein vielversprechender Ansatz, der diese starke Verzahnung aufweist, beruht auf einer mehrstufigen Dekomposition und Integration des Planungsproblems. Dieser Gedanke bildet die Ausgangsbasis für das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde integrierte Lösungsverfahren.

1.3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise

Aus der Problemstellung heraus ergibt sich als übergeordnetes Ziel dieser Arbeit die Entwicklung und Bewertung eines integrierten Lösungsverfahrens für die Produktionsplanung in der Werkstattfertigung und den anschließenden überbetrieblichen Transport zu verschiedenen Transportzielen. Das zu entwickelnde Lösungsverfahren soll so gestaltet sein, dass sie nicht auf der sequenziellen Betrachtungsweise basiert sondern eine hohe Verzahnung der beiden Teilprobleme und somit eine möglichst hohe Integration aufweist. Auf Grund der hohen Komplexität des integrierten Planungsproblems handelt es sich bei dem zu entwickelnden Lösungsverfahren um eine Heuristik. Für die Entwicklung dieser Heuristik werden zunächst bestehende integrierte Planungsansätze hinsichtlich ihrer Funktionsweise untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird mit Hilfe einer neu strukturierten Vorgehensweise ein integriertes Lösungsverfahren entwickelt.

Auf dem Weg zum übergeordneten Ziel dieser Arbeit werden mehrere Teilziele definiert, deren Inhalt und Reihenfolge sich im Aufbau der Arbeit widerspiegelt. Diese Teilziele lassen sich hinsichtlich ihrer Relevanz für die Entwicklung des integrierten Lösungsverfahrens in Haupt- und Nebenziele unterscheiden. Hauptziele stellen wichtige Meilensteine für das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Lösungsverfahren dar, sind Bestandteil der Verfahrensentwicklung und werden im Zuge dessen angewendet. Nebenziele tragen nicht direkt zur Verfahrensentwicklung bei. Sie sollen vielmehr die im Zuge dieser Arbeit identifizierten Lücken im Stand der Forschung bei der Betrachtung des integrierten Planungsproblems von Produktion und Transport schließen. Damit liefern sie einen ergänzenden und dennoch wichtigen Beitrag zur umfassenden Betrachtung dieser Thematik. Die Ergebnisse der Nebenziele werden an den entsprechenden Stellen vorgestellt und entsprechend referenziert aber nicht umfassend diskutiert. Die im Zuge der Arbeit an dieser Thematik entstandenen Ergebnisse gehen somit weit über die Entwicklung und Bewertung eines integrierten Lösungsverfahrens hinaus. Die unterschiedlichen Teilziele, die im Folgenden noch näher erläutert werden, deren Einordnung als Haupt- oder Nebenziel sowie deren zeitliche Reihenfolge sind in der Abbildung 2 dargestellt.

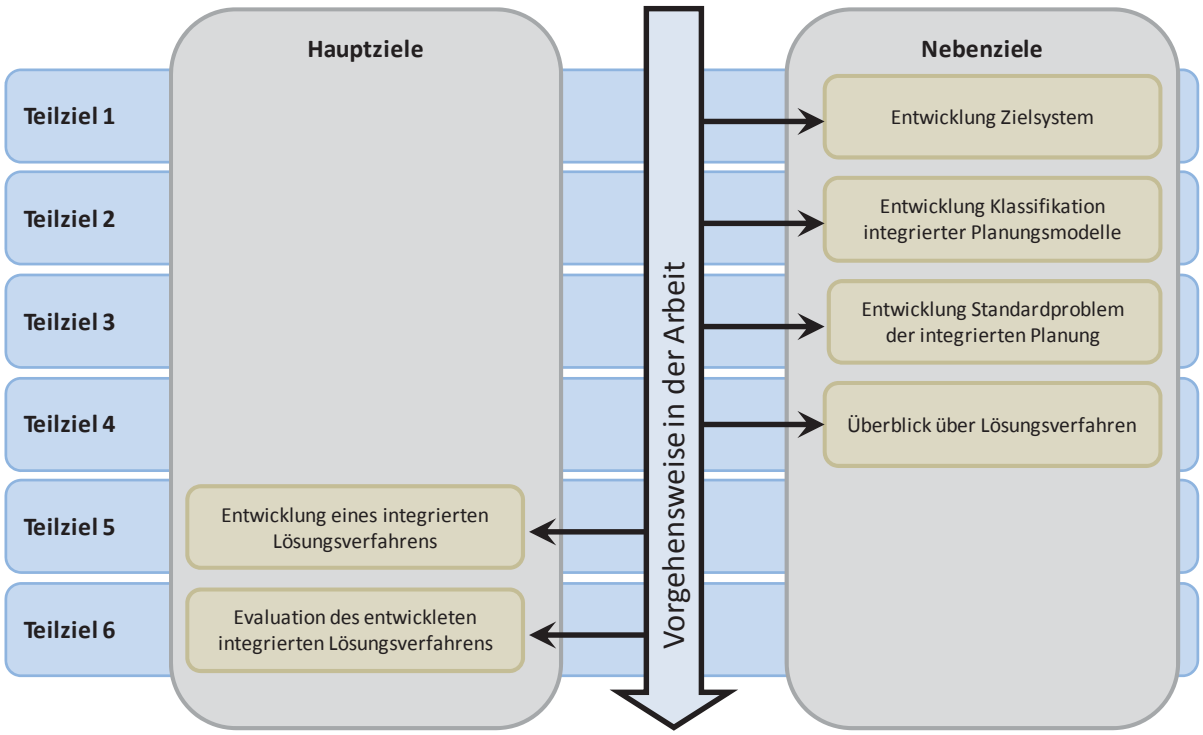


Abbildung 2: Vorgehensweise in der Arbeit und deren Teilziele

Das erste Teilziel liegt in der Entwicklung eines Zielsystems der integrierten Planung. Für die Teilprobleme Produktions- und Transportplanung sind jeweils entsprechende Zielsysteme vorhanden. Für das integrierte Planungsproblem hingegen konnte diesbezüglich noch Entwicklungsbedarf identifiziert werden.

Analog zum Zielsystem besteht auch bei der Klassifikation integrierter Planungsmodelle noch Entwicklungsbedarf. Für die jeweiligen Teilprobleme sind bereits mehrere mögliche Klassifikationen vorhanden. Für die integrierte Planung wurde bisher ein Klassifikationsschema entwickelt, welches jedoch wegen der Vielzahl der möglichen Modellparameter nicht ausreichend ist. Folglich besteht das zweite Teilziel in der Entwicklung eines Klassifikationsschemas für integrierte Planungsmodelle.

Das dritte Teilziel liegt in der Formulierung eines Standardproblems für die integrierte Produktionsplanung in der Werkstattfertigung und den anschließenden überbetrieblichen Transport. Zur Erreichung dieses Ziels sollen die vorhandenen Planungsansätze hinsichtlich ihrer Modellannahmen untersucht werden. Daraus soll in dieser Arbeit ein Standardproblem der integrierten Planung und das zugrunde liegende Planungsmodell abgeleitet werden. Darüber hinaus soll das zu entwickelnde Standardproblem um weitere Punkte ergänzt werden, die in den bisherigen Planungsansätzen oftmals nicht berücksichtigt wurden. Dabei handelt es sich beispielsweise um die Betrachtung begrenzter Transportkapazitäten. Durch diese Ergänzungen erfolgt eine Annäherung der Modellbedingungen an ein reales Szenario. Dieses Standardproblem soll im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage für die Evaluation des zu entwickelnden integrierten Lösungsverfahrens dienen.

Die Erarbeitung eines Überblicks über die eingesetzten Verfahren zur Lösung integrierter Planungsprobleme stellt das vierte Teilziel dar. Dadurch sollen die bisher entwickelten Lösungsverfahren identifiziert und klassifiziert werden. In der Literatur ist eine solche Klassifizierung bisher nicht vorhanden. Darüber hinaus sollen auf diese Weise wenig Erfolg versprechende Planungsansätze für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Das fünfte Teilziel besteht in der Entwicklung eines Lösungsverfahrens zur Lösung des Standardproblems der integrierten Planung. Dabei soll das zu entwickelnde Lösungsverfahren nicht nach der sequenziellen Vorgehensweise arbeiten sondern separat für die jeweiligen Teilprobleme sehr gute Lösungen erzeugen und gleichzeitig eine starke Verzahnung der beiden Teilprobleme aufweisen. Zur Erzeugung von Lösungen für die beiden Teilprobleme sollen bekannte Verfahren aus der Produktions- und Transportplanung eingesetzt werden. Dieses Teilziel entspricht dem übergeordneten Ziel der Arbeit.

Die Evaluation des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens und ein darüber hinausgehender Leistungsvergleich mit den zuvor identifizierten Vergleichsverfahren stellen das letzte Teilziel dieser Arbeit dar, das ebenfalls einem der Hauptziele entspricht. Dabei soll das entwickelte Lösungsverfahren auf das Standardproblem der integrierten Planung angewendet werden. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des entwickelten Lösungsverfahrens sowie die Beurteilung der Leistungsfähigkeit sollen mit Hilfe der Simulation erfolgen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung in diesem Abschnitt, die eine Einführung in die Thematik der integrierten Planung sowie die Darlegung der Problemstellung und die daraus abgeleitete Zielsetzung enthielt, beziehen sich die beiden nachfolgenden Kapitel auf den Stand der Forschung. Dabei werden in den Kapiteln 2 bzw. 3 zunächst die Grundlagen für die Teilprobleme der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung bzw. die Transportplanung gelegt. Die entsprechenden Unterabschnitte befassen sich beispielsweise mit der Einordnung des jeweiligen Teilproblems in Funktionsbereiche eines Unternehmens sowie mit der Dynamik und Determiniertheit des entsprechenden Teilproblems. Darüber hinaus wird bei jedem Teilproblem auf die Klassifikationsmöglichkeiten der vorhandenen Planungsmodelle eingegangen. Anschließend wird für jedes Teilproblem das Standardproblem dargestellt sowie ein Überblick über die jeweils dazu gehörenden Lösungsverfahren gegeben. Abschließend werden für jedes Teilproblem ausgewählte Lösungsverfahren detailliert vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Anwendung kommen.

Im sich daran anschließenden Kapitel 4 werden die Grundlagen für die integrierte Betrachtung der beiden Teilprobleme gelegt. Dazu wird das integrierte Planungsproblem zunächst definiert. Anschließend erfolgt Abgrenzung zu häufig in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffen und eine Einordnung der integrierten Planung als Instrument in das Supply Chain Management. Nachfolgend werden Unterschiede zu ähnlichen Instrumenten des Supply Chain Management erläutert. Darauf aufbauend wird auf das Zielsystem sowie die daraus entstehenden Konflikte und das Verbesserungspotenzial eingegangen. Weiterhin wird eine im Zuge dieser Arbeit entwickelte Klassifikation integrierter Planungsmodelle vorgestellt. Im weiteren Verlauf wird das Standardproblem der integrierten Planung vorgestellt, dass ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Abschließend wird in diesem Abschnitt ein Überblick über die eingesetzten Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems sowie deren Klassifikation gegeben bevor ausgewählte Lösungsverfahren detailliert vorgestellt werden.

Die Funktionsweise des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens, das aus einem ebenfalls in diesem Zusammenhang entwickelten Framework abgeleitet wurde, wird in Kapitel 5 detailliert vorgestellt. In Kapitel 6 wird die Evaluation dieses Lösungsverfahrens ausführlich beschrieben. Diese wurde an einem Szenario durchgeführt, das anhand des Standardproblems der integrierten Planung charakterisiert wurde. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit des entwickelten Lösungsverfahrens

gegenüber ausgewählten Vergleichsverfahren mit Hilfe der Simulation ermittelt. Dazu wird zunächst der Aufbau der experimentellen Untersuchung beschrieben und anschließend die statistisch aufbereiteten Ergebnisse vorgestellt.

Kapitel 7 fasst die beschriebenen Arbeiten und Erkenntnisse zusammen. Letztere werden zudem kritisch betrachtet und es wird ein Ausblick auf künftige Forschungsfelder gegeben, die im Rahmen dieser Arbeit identifiziert wurden.

2 Teilproblem: Produktionsplanung in der Werkstattfertigung

In diesem Abschnitt wird das Teilproblem der Produktionsplanung zunächst allgemein beschrieben. Anschließend werden die für diese Arbeit relevanten Verfahren der Produktionsplanung detailliert eingeführt. Diese Verfahren werden im weiteren Verlauf bei der Entwicklung des integrierten Lösungsverfahrens verwendet oder kommen als Vergleichsverfahren zum Einsatz.

2.1 Grundlagen der Produktionsplanung

2.1.1 Planung und Zielsystem im Kontext der Produktion

Der Begriff Planung wird als ein Entscheidungsprozess definiert, bei dem es um die Zuordnung von Aufgaben zu vorhandenen Ressourcen innerhalb eines definierten Zeitraums geht, wobei das Ziel dieses Entscheidungsprozesses die Optimierung einer oder mehrerer Zielkriterien ist (vgl. [Stadtler, 2009] und [Pinedo, 2012]). Im Kontext der Produktion entsprechen die Aufgaben den Fertigungsaufträgen und die Ressourcen den vorhandenen Produktionsmaschinen oder Bearbeitungsstationen. Bei der Planung der Produktion auf operativer Ebene werden in der deutsch- und englischsprachigen Literatur unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet, die nicht einheitlich definiert sind und daher zu Unstimmigkeiten führen [Acker, 2011]. Aus diesem Grund ist zunächst eine Definition der Begriffe notwendig, so wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

Die Produktionsplanung auf operativer Ebene (im Folgenden als Produktionsplanung oder Maschinenbelegungsplanung bezeichnet) umfasst die Reihenfolge- und Terminplanung. Bei der Reihenfolgeplanung (Sequencing) ist für jede Bearbeitungsstation die Reihenfolge festzulegen, in der die Aufträge auf der jeweiligen Maschine zu bearbeiten sind. Auf Grund der beschränkten Kapazitäten der Bearbeitungsstationen kann es dazu kommen, dass Aufträge in Konkurrenz zueinander stehen [Acker, 2011]. Bei der Terminplanung (Scheduling, Feinplanung, Feinterminierung) wird die vorher festgelegte Reihenfolgeplanung mit kalendarischen Zeiten hinterlegt. Bearbeitungsbeginn und -ende jedes einzelnen Auftrags werden somit für jede Maschine terminiert. Damit beschäftigt sich die Produktionsplanung mit dem grundlegenden Problem, in welcher Reihenfolge und zu welchem Zeitpunkt welche Fertigungsaufträge auf welchen Bearbeitungsstationen bearbeitet werden [Zäpfel und Braune, 2005]. Das Ergebnis der Produktionsplanung, so wie sie in dieser Arbeit verstanden wird, ist ein Maschinenbelegungsplan (oder auch Ablaufplan, Reihenfolgeplan, Auftragsreihenfolgeplan oder Schedule), der die Zuordnung der Arbeitsgänge einzelner Aufträge zu den vorhandenen Ressourcen für eine Planungsperiode enthält [Teichner, 2010]. Zur grafischen Darstellung dieses Ergebnisses eignet sich unter anderem das Gantt-Diagramm [Brucker, 2007].

Die Aufgaben der Produktionsplanung dienen nicht der Erreichung eines einzelnen Zieles. Vielmehr handelt es sich um ein Zielsystem, das in Anlehnung an Wiendahl (2009) in der Abbildung 3 dargestellt ist, und dessen Teilziele sich in einer ersten Unterteilung aus Logistikkosten und Logistikleistung zusammenfügen. Bei einer weiteren Detaillierung ergeben sich die Logistikkosten aus den Herstellkosten und den Kapitalbindungskosten. Niedrige Herstellkosten ergeben sich unter anderem aus einer hohen Auslastung. Geringe Kapitalbindungskosten sind die Folge niedriger Bestände. Die Logistikleistung setzt sich aus der Liefertreue und der Lieferzeit zusammen. Für eine

möglichst hohe Liefertreue sind eine hohe Termintreue und für eine geringe Lieferzeit kurze Durchlaufzeiten erforderlich.

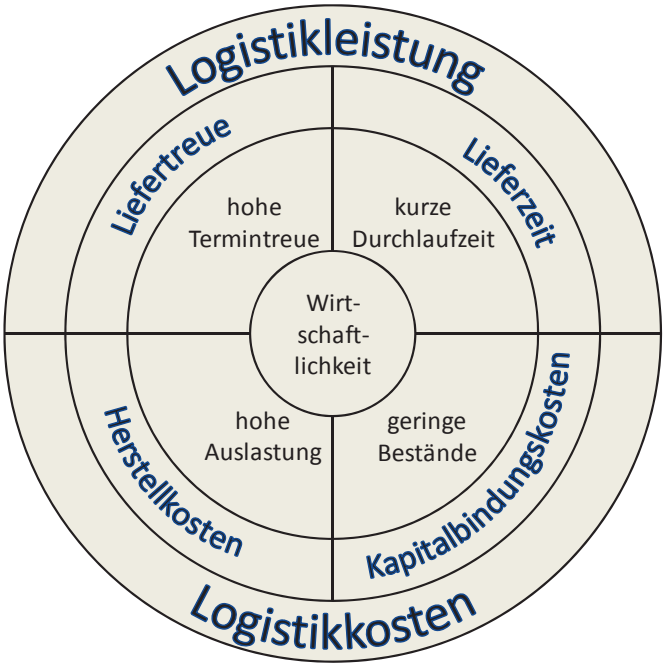


Abbildung 3: Zielsystem der Produktionsplanung

Aus diesem Zielsystem ergibt sich auf Grund unterschiedlicher Interessen des Unternehmens und deren Kunden ein Zielkonflikt, der als Dilemma der Produktionsplanung bezeichnet wird [Erlach, 2013]. Eine möglichst hohe Logistikleistung und damit kurze Durchlaufzeiten sowie eine hohe Termintreue zu möglichst geringe Logistikkosten sind Anforderungen aus der Sicht des Kunden. Aus Sicht des Unternehmens lassen sich diese Anforderungen nur über hohe Bestände und eine hohe Auslastung erfüllen. Dadurch erhöhen sich allerdings die Logistikkosten und damit der Preis, den die Kunden zahlen sollen. Dies wiederum liegt weder im Interessen des Kunden noch des Unternehmens und verdeutlicht das Dilemma der Produktionsplanung.

Der Produktionsplanung kommt somit eine herausgehobene Bedeutung zu, da unter anderem mit Hilfe dieser Zielkriterien der wirtschaftliche Erfolg eines produzierenden Unternehmens überwacht und gelenkt werden kann. Die Produktion selbst wird als die zentrale Funktion eines Unternehmens bezeichnet [Dyckhoff und Spengler, 2010]. Demzufolge stellt die Produktionsplanung eine der wesentlichen Planungsaufgaben in einem Industrieunternehmen dar (vgl. [Günther und Tempelmeier, 2012], [Schuh und Gierth, 2006], [Vahrenkamp, 2008], [Wiendahl, 2009] und [Corsten und Gössinger, 2012]).

2.1.2 Einordnung der Produktionsplanung in das Produktionsmanagement

Die Produktionsplanung lässt sich bei einer funktionalen Gliederung eines Unternehmens in den Bereich des Produktionsmanagements einordnen, dessen Hauptaufgabe die zielgerichtete Planung und Steuerung der Produktion im Allgemeinen ist. In Abhängigkeit vom Entscheidungshorizont wird zwischen strategischem, taktischem und operativem Produktionsmanagement unterschieden. Auf strategischer Ebene des Produktionsmanagements werden grundlegende Entscheidungen mit

langfristigen Auswirkungen wie beispielsweise Standortentscheidungen getroffen [Schneider et al., 2010]. Die taktische Ebene setzt die auf strategischer Ebene des Produktionsmanagements getroffenen Entscheidungen um, entwickelt Konzepte und Maßnahmenpläne und verwirklicht diese in entsprechenden Projekten [Schneider et al., 2010]. Relevante Fragestellungen auf dieser Ebene umfassen unter anderem Entscheidungen über die Fertigungstiefe oder über zukünftig einzusetzende Produktionstechnologien [Dyckhoff und Spengler, 2010]. Die Entscheidungen des strategischen und taktischen Produktionsmanagements definieren Rahmenbedingungen, die sich aus den kapazitiven Restriktionen des vorhandenen Produktionssystems ergeben. Diese Rahmenbedingungen bilden die Grundlage für Entscheidungen auf operativer Ebene, die beispielsweise das Produktionsprogramm betreffen, welches die Art, die Menge und die Reihenfolge der in einer Periode zu produzierenden Güter, festlegt [Dyckhoff und Spengler, 2010]. Dabei wird auf operativer Ebene weiterhin in die Bereiche der operativen Faktorplanung und der Programmplanung sowie in die operative Prozessplanung und -steuerung unterschieden [Teichner, 2010]. Die in dieser Arbeit betrachtete Produktionsplanung wird dabei dem letztgenannten Bereich zugeordnet. Die Abbildung 4 verdeutlicht die Einordnung der Produktionsplanung in die funktionale Gliederung eines Unternehmens in Anlehnung an Teichner (2010).

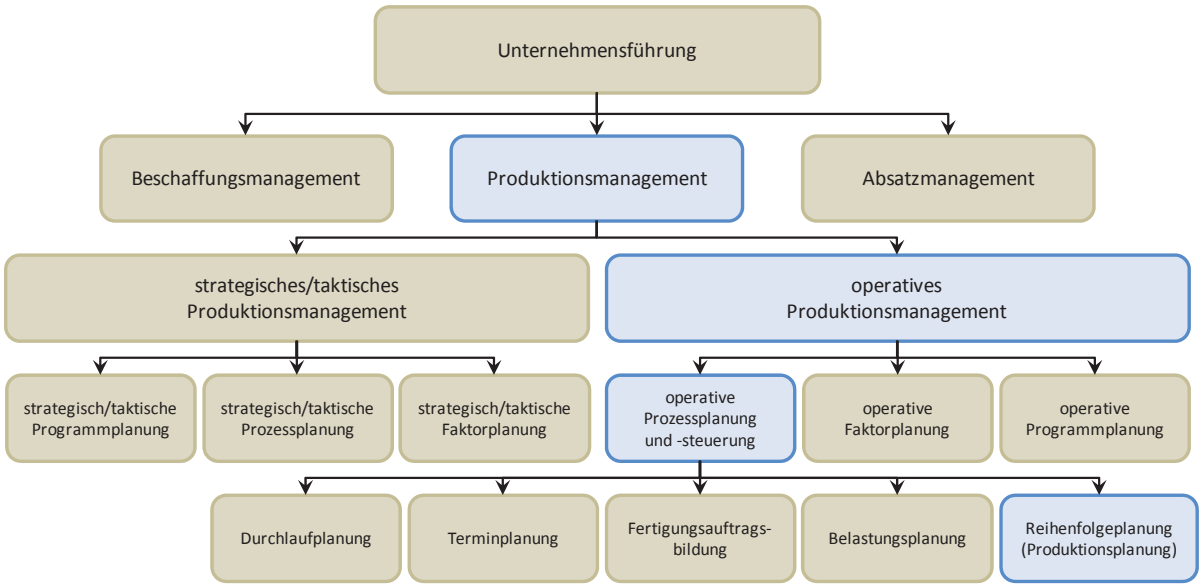


Abbildung 4: Funktionale Einordnung der Produktionsplanung

2.1.3 Charakterisierung von Produktionssystemen

Die Durchführung einer Produktionsplanung und die dafür verwendeten Verfahren und Methoden sind abhängig vom Typ des betrachteten Produktionssystems [Jodlbauer, 2008]. Aus diesem Grund erfolgt zunächst eine grobe Typisierung industrieller Produktionssysteme zur besseren Einordnung und Charakterisierung der hier betrachteten Werkstattfertigung.

Produktionssysteme lassen sich nach Schneider et al. (2005) im Wesentlichen hinsichtlich der Merkmale Auftragstyp sowie Prozesstyp und Organisationstyp beschreiben. Hinsichtlich des Merkmals des Auftragstyps werden angebots- und nachfrageorientierte Produktionssysteme unterschieden. Im Gegensatz zur angebotsorientierten Produktion, bei der meist standardisierte Güter in Großserien- oder Massenfertigung hergestellt werden, ist bei einer nachfrageorientierten Produktion eine kundenindividuelle Herstellung von Einzelstücken oder Kleinserien zu finden. Das

Merkmal des Prozesstyps kennzeichnet die Art der Fertigung in Bezug auf die Menge produzierter identischer Güter. Es wird dabei zwischen Einzel-, Serien- und Massenfertigung unterschieden. Bei der Einzelfertigung wird entweder ausschließlich ein Produkt oder mehrere aber dennoch einzigartige Produkte hergestellt. Im Gegensatz dazu wird bei einer Serienfertigung eine Menge gleichartiger Produkte hergestellt. In Abhängigkeit von der Menge der produzierten Güter spricht man von Klein-, Mittel- oder Großserienfertigung. Von einer Massenfertigung wird gesprochen, wenn eine sehr große Anzahl gleichartiger Produkte hergestellt wird. Ein sehr hoher Automatisierungsgrad der Fertigung ist kennzeichnend für diese Form des Prozesstyps. Die Merkmale Auftragstyp und Prozesstyp determinieren das Merkmal Organisationstyp, dessen Ausprägungen nach Schneider et al. (2005) im Folgenden beschrieben werden.

Bei der Betrachtung des Organisationstyps eines Produktionssystems wird grundlegend zwischen dem Verrichtungsprinzip und dem Objektprinzip unterschieden, woraus sich unterschiedliche Ausprägungen der Fertigungsorganisation ableiten lassen. Bei der Organisation einer Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip werden gleichartige Tätigkeiten räumlich zu Werkstätten (Job Shops) zusammengefasst (z. B. Lackiererei, Dreherei, etc.). Bei einer Werkstattfertigung durchlaufen die unterschiedlichen Objekte die verschiedenen Werkstätten entsprechend der jeweiligen aber für jedes Objekt fest vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge. Die einzelnen Werkstätten sind dabei jeweils durch Puffer voneinander entkoppelt [Gudehus, 2010]. Eine davon abweichende Form der Fertigungsorganisation, die ebenfalls nach dem Verrichtungsprinzip arbeitet und Werkstätten verwendet, stellt der Open Shop dar. Dabei durchläuft jedes Objekt alle Bearbeitungsstationen genau ein Mal. Allerdings spielt die Reihenfolge, in der die einzelnen Arbeitsschritte durchgeführt werden, keine Rolle. Im Gegensatz zur Job Shop Fertigung existiert somit bei der Open Shop Fertigung keine vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge. Für die einzelnen Werkstätten ergeben sich bei einer Fertigungsorganisation nach dem Verrichtungsprinzip entsprechend dem jeweils zu bearbeitenden Objekt wechselnde Arbeitsaufträge mit den eventuell notwendigen Rüstvorgängen und ein diskontinuierlicher Materialfluss. [Schneider et al., 2010]

Im Gegensatz dazu werden bei einer Fertigungsorganisation nach dem Objektprinzip die für die Produktion benötigten Ressourcen und Betriebsmittel räumlich so angeordnet, dass diese der Bearbeitungsreihenfolge der Objekte entsprechen. Dabei sind zwischen den Bearbeitungsstationen, die in Reihe geschaltet sind, keine Puffer zur Entkopplung vorhanden [Gudehus, 2010]. Bei dieser Fließfertigung (Flow Shop) durchlaufen alle Objekte die Bearbeitungsstationen in einer identischen und fest vorgegebenen Reihenfolge, die sich wiederum aus prozessbedingten und technologischen Anforderungen bei der Herstellung dieses Produktes ergibt. Die Objekte durchlaufen jede Bearbeitungsstation genau ein Mal. Die einzelnen Arbeitsstationen einer Fließfertigung führen in der Regel immer identische Tätigkeiten aus und sind dabei durch einen kontinuierlichen Materialfluss gekennzeichnet. Der bekannteste Ausprägung dieses Organisationstyps ist die Fließbandfertigung. [Schneider et al., 2010]

Neben der Werkstattfertigung und der Fließfertigung existieren weitere Organisationstypen wie beispielsweise die Baustellenfertigung und die Zentrenfertigung sowie flexiblere Formen der vorgestellten Flow Shop und Job Shop Fertigungsorganisationen (vgl. [Schneider et al., 2010] und [Acker, 2011]). Bei der Baustellenfertigung werden alle durchzuführenden Arbeiten an einem ortsfesten Objekt und in den meisten Fällen in einer zeitlich festgelegten Bearbeitungsreihenfolge durchgeführt. Dadurch erfolgt bei der Baustellenfertigung eine Kombination aus Verrichtungs- und Objektprinzip, die auch die Zentrenfertigung aufweist. Bei dieser werden alle benötigten Ressourcen, die zur vollständigen Bearbeitung eines Produktspektrums erforderlich sind, räumlich

zusammengefasst und objektorientiert angeordnet. Beim flexiblen Flow Shop Problem stehen auf jeder der verschiedenen Fertigungsstufen mehrere parallele Bearbeitungsmaschinen zur alternativen Verwendung zur Verfügung.

Die Abbildung 5 stellt die Einordnung der in dieser Arbeit betrachteten Werkstattfertigung in die Typisierung von Produktionssystemen dar und grenzt das Anwendungsgebiet von der Fließfertigung ab. In dem sich überschneidenden Bereich können in Abhängigkeit vom Produkt beide Organisationstypen zur Anwendung kommen. Da die anderen vorgestellten Organisationstypen Mischformen von Verrichtungs- und Objektprinzip darstellen und wegen der Übersichtlichkeit der Abbildung, sind diese hier nicht dargestellt.

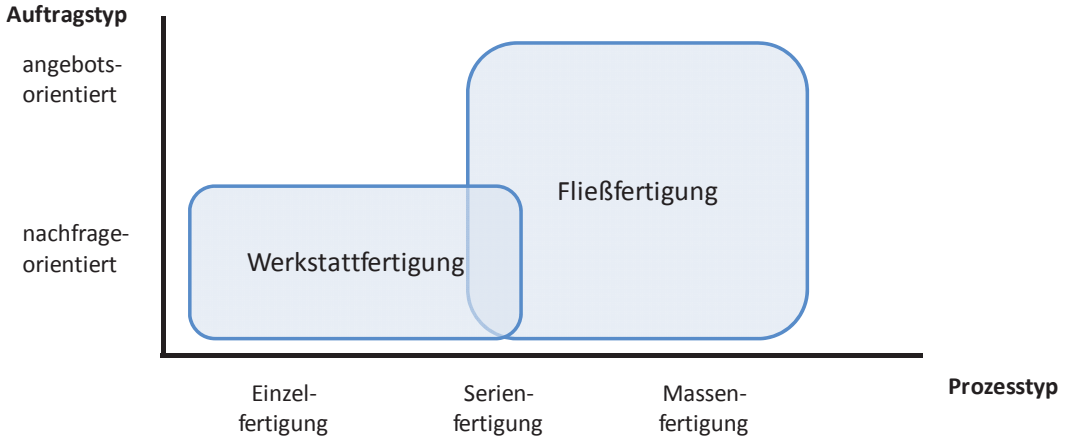


Abbildung 5: Einordnung der Werkstattfertigung in die Typisierung von Produktionssystemen

2.1.4 Dynamik und Determiniertheit bei der Produktionsplanung

Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit der Unterscheidung von Produktionsplanungsproblemen bezieht sich auf die zeitliche Ankunft der Aufträge und auf den Informationsstand über relevante Planungsgrößen zum Planungszeitpunkt. Hinsichtlich des Auftragseingangs lassen sich statische und dynamische Probleme differenzieren. Liegt zum Planungszeitpunkt der gesamte Auftragsbestand vor, wird von einem statischen Produktionsplanungsproblem gesprochen. Im Gegensatz zu statischen Planungsproblemen kommen bei dynamischer Betrachtungsweise während der gesamten Planungsperiode sukzessiv neue Fertigungsaufträge hinzu. Der Planungsprozesses, der in regelmäßigen Abständen vollzogen wird, verfügt folglich nur über einen unvollständigen Auftragsbestand. [Teichner, 2010]

Produktionsplanungsprobleme können darüber hinaus hinsichtlich des Informationsstandes über relevante Planungsgrößen in deterministisch und stochastisch unterteilt werden. Demnach sind Produktionsplanungsprobleme determiniert, wenn für den Planungsprozess alle relevanten Informationen bekannt und eindeutig bestimmt sind. Dazu zählen beispielsweise Daten zu Lieferterminen sowie Bearbeitungszeiten und Auftragsmengen. Stochastische Produktionsplanungsprobleme hingegen sind dadurch gekennzeichnet, dass weder zum Planungszeitpunkt noch während des Planungszeitraums vollständige Informationen zu diesen Daten vorliegen. Um dennoch eine Planung durchführen zu können, werden anstatt determinierter Informationen statistische Aussagen zur Wahrscheinlichkeit herangezogen. [Neidhardt, 2007]. Das in dieser Arbeit betrachtete Produktionsplanungsproblem ist statisch-deterministisch.

2.1.5 Klassifikation von Planungsmodellen der Produktionsplanung

Das grundlegende Problem der Maschinenbelegungsplanung ist die Entscheidung darüber, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Reihenfolge welche Fertigungsaufträge auf welchen Fertigungsstationen bearbeitet werden [Zäpfel und Braune, 2005]. Zur Lösung dieses Planungsproblems wurden eine Vielzahl von Planungsmodellen entwickelt, die sich hinsichtlich der Ausprägung verschiedener Modellparameter unterscheiden [Ramasesh, 1990]. Diese Modellparameter charakterisieren das zugrunde liegende Planungsmodell hinsichtlich der unterschiedlichen Ausprägungen der Maschinenkonfiguration (α), der Auftragsparameter (β) und der Zielfunktion (γ). Diese Klassifikation wurde von Graham et al. (1979) entwickelt und als 3-Felder-Notation ($\alpha \mid \beta \mid \gamma$) beschrieben. Für die Modellparameter Maschinenkonfiguration und Auftragsparameter existieren weitere Detaillierungsstufen, die ihrerseits wiederum Modellparameter mit unterschiedlichen Ausprägungen enthalten und eine weitere Differenzierung der Planungsmodelle erlauben. Darüber hinaus existieren weitere Möglichkeiten zur Klassifikation von Modellen der Produktionsplanung, die ähnliche Parameter betrachten (vgl. [Conway et al., 2003] und [Allahverdi et al., 2008]). In dieser Arbeit wird auf die Klassifikation von Graham et al. (1979) zurückgegriffen, die als Ausgangsbasis für die hier getroffenen Erweiterungen dient. Diese wird im weiteren Verlauf der Arbeit erneut aufgegriffen und fließt in die Entwicklung einer Klassifikation integrierter Planungsmodelle ein.

Der Modellparameter Maschinenkonfiguration wird in zwei weitere Parameter (α_1 und α_2) unterteilt, womit die Anordnung der Maschinen (α_1) sowie deren Anzahl (α_2) beschrieben werden. Unter der Maschinenanordnung ist die Art der Fertigungsorganisation zu verstehen, wie sie oben beschrieben wurde. Daraus kann die Anordnung und die Anzahl der Maschinen abgeleitet werden. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine Anzahl identischer und paralleler Maschinen (Werkstattfertigung) oder um eine Anzahl von Maschinen handeln, die mittels eines kontinuierlichen Materialfluss miteinander verbunden sind (Fließfertigung). Hinsichtlich der Auftragsparameter werden sechs weitere Parameter (β_1 bis β_6) differenziert. Darüber wird ausgedrückt, ob die Bearbeitung eines Auftrags unterbrochen werden darf (β_1), ob die vorhandenen Maschinen mit beschränkten Kapazitäten modelliert wurden (β_2) oder ob den Bearbeitungsaufträgen Prioritäten zugeordnet sind (β_3). Darüber hinaus kann dargestellt werden, ob die vorliegenden Aufträge ein identisches Freigabedatum aufweisen (β_4), ob es eine konstante Obergrenze bezüglich der Maschinenanzahl gibt (β_5). Weiterhin kann ausgedrückt werden, ob die zu bearbeitenden Aufträge eine identische Bearbeitungszeit besitzen (β_6). [Graham et al., 1979]

Zur detaillierten Beschreibung von Produktionsplanungsmodellen wurde diese Charakterisierung im Rahmen dieser Arbeit um weitere Modellparameter ergänzt. Diese Erweiterung war notwendig, da für eine Charakterisierung der in der Literatur vorhandenen Produktionsplanungsmodelle die bisherige Klassifikation nach der hier vertretenen Auffassung nicht ausreichend ist. Bei diesen Erweiterungen handelt es sich um die Beschreibung, ob alle Aufträge einen einheitlichen Liefertermin haben (β_7). Darüber hinaus wurde die Maschinenverfügbarkeit (β_8) sowie die Beschreibung ökonomischer Größen wie fixe und variable Produktionskosten (β_9 und β_{10}) sowie Rüstkosten (β_{11}) und mögliche Strafkosten bei verspäteter Fertigstellung (β_{12}) ergänzt.

Über den Modellparameter der Zielfunktion werden die in dem jeweiligen Modell verfolgten Optimierungsziele ausgedrückt. Dabei kann es sich beispielsweise um die Minimierung der Durchlaufzeit oder der Verspätung sowie der Produktionskosten handeln. Auch eine Kombination mehrerer Zielkriterien kann mit dieser Notation ausgedrückt werden. Die Abbildung 6 gibt einen Überblick über die Modellparameter ohne auf die einzelnen Ausprägungen einzugehen. Dazu soll an

dieser Stelle ein Verweis auf den Anhang 3 ausreichen, in dem sowohl die ursprüngliche Klassifikation als auch die hier getroffenen Erweiterungen mit ihren jeweiligen Ausprägungen dargestellt sind. In Abschnitt 4.1.6 wird bei der Entwicklung einer Klassifikation integrierter Planungsmodelle auf die hier vorgestellte Notation zurückgegriffen.

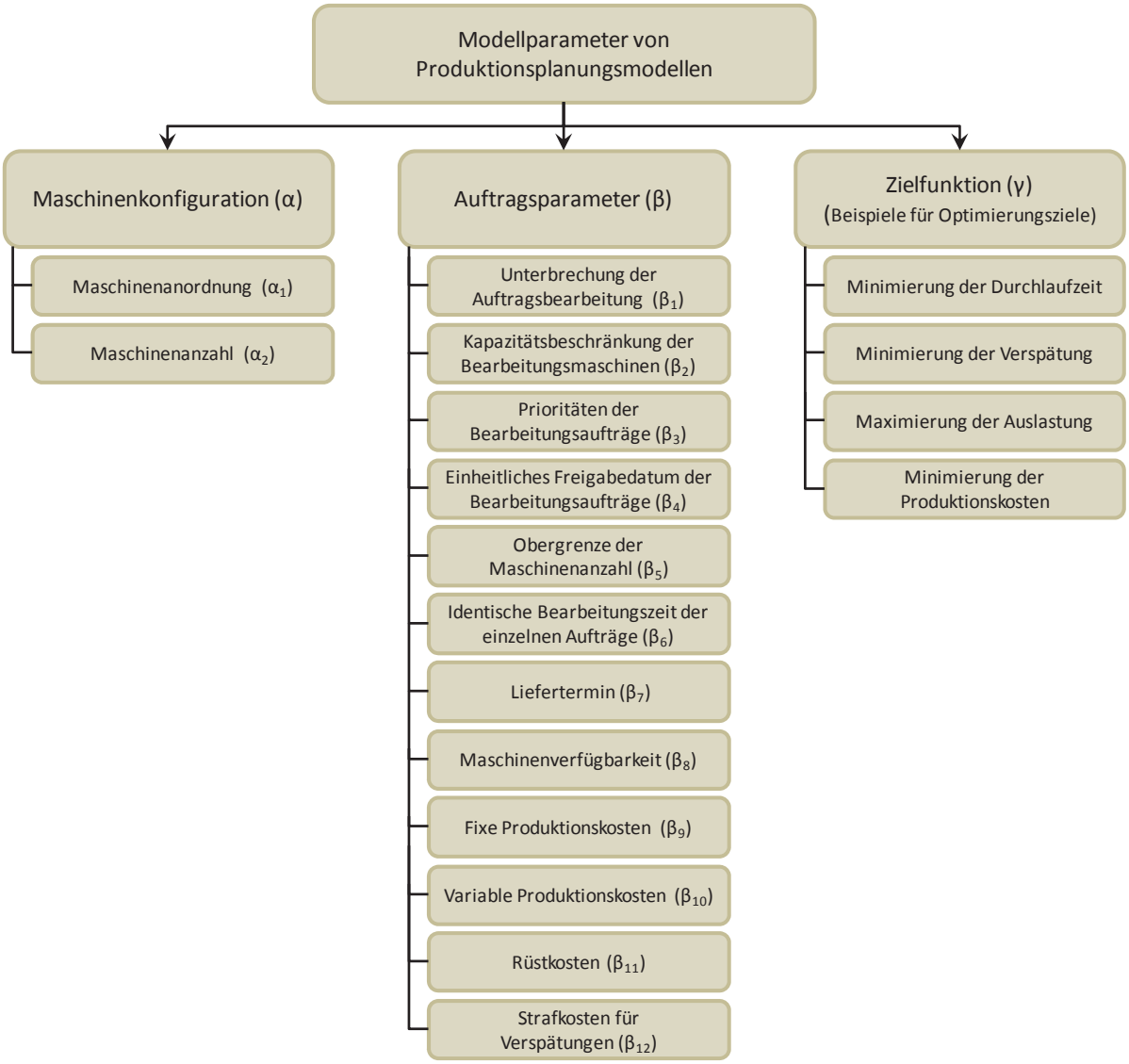


Abbildung 6: Überblick über Modellparameter von Produktionsplanungsmodellen

2.2 Das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung

In der Literatur findet sich für das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung, das auch als Job-Shop-Scheduling-Problem (JSSP) bezeichnet wird, die folgende formale Beschreibung (vgl. [Jain und Meeran, 1998], [Henning, 2002], [Zäpfel und Braune, 2005], [Brucker, 2007] und [Brucker, 2007a]).

Gegeben ist eine bestimmte Menge J aus j Jobs mit $J=\{J_i\}_{i=1}^{j}$, die auf einer bestimmten Menge M mit m Maschinen $M=\{M_l\}_{l=1}^{m}$ bearbeitet werden müssen. Jeder Job J_i besteht aus einer Menge von O_i Operationen mit $O_i=\{O_{ik}\}_{k=1}^{oi}$, die auch als Tasks bezeichnet werden. Die zu einem Job gehörenden Tasks müssen in einer fest vorgegebenen Reihenfolge auf den Maschinen bearbeitet werden (Vorgängerbedingungen). Insgesamt gibt es P Operationen $P=\sum_{i=1}^{j} oi$. Die Operation O_l gehört zum Auftrag J_i, der auf Maschine M_l für die Dauer von p_{il} bearbeitet wird. Darüber hinaus gelten die folgenden Annahmen. Jeder Job hat eine individuelle, technologisch bedingte und von anderen Aufträgen unabhängige Bearbeitungsreihenfolge (Unabhängigkeitsbedingung, siehe Ausdruck (2)). Außerdem gilt, dass jeder Job auf jeder Maschine genau ein Mal bearbeitet wird und keine dieser Operationen unterbrochen und zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden kann (siehe Ausdruck (3)). Weiterhin wird unterstellt, dass ein Job nicht von zwei Maschinen gleichzeitig bearbeitet (Unteilbarkeitsbedingung). Darüber hinaus wird durch den Ausdruck (3) für jede Maschine M_l eine Menge an Operationen E_l beschrieben, die nicht zu einem Job gehören aber auf der gleichen Maschine ausgeführt werden. Vor jeder Bearbeitungsstation gibt es Warteschlangen, wodurch Wartezeiten der Jobs erlaubt werden. Transportzeiten zwischen den einzelnen Maschinen werden vernachlässigt.

Bei einem zulässigen Maschinenbelegungsplan sind die genannten Bedingungen erfüllt und die Startzeitpunkte der einzelnen Operationen entsprechen der Bedingung $t_{ikl} \geq 0$ (siehe Ausdruck (4)). Dadurch wird sichergestellt, dass einzelne Operationen nicht bereits zu Beginn der Produktionsperiode begonnen wurden. Das Ziel ist es, einen Maschinenbelegungsplan zu ermitteln, der eine gegebene Zielfunktion minimiert bzw. maximiert. Für das klassische JSSP besteht die Zielfunktion in der Minimierung der maximalen Durchlaufzeit $C_{\max}^{prod}$ (makespan). Damit lassen sich die folgende Zielfunktion und die dazugehörigen Nebenbedingungen mathematisch formulieren.

Zielfunktion (γ):

$$\min\left(C_{\max}^{prod}\right)=\max_{i}\left(\min_{l}\left(t_{ioil}+p_{ioil}\right)\right) \tag{1}$$

Nebenbedingungen:

$$t_{ikl_1}+p_{ikl_1}\leq t_{ik+1l_2} \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in\{1,\ldots oi-1\},\ \forall l_1,l_2\in M \tag{2}$$

$$t_{i_1k_1l}+p_{i_1k_1l}\leq t_{i_2k_2l} \qquad \forall i_1,i_2\in J,\ \forall k_1\in O_{i1},k_2\in O_{i2},\ \forall l\in M \tag{3}$$

$$t_{ikl}\geq 0 \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in O_i,\ \forall l\in M \tag{4}$$

Das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung berücksichtigt keine Betrachtung ökonomischer Größen. Die Erweiterung um ökonomische Aspekte ist notwendig für die Entwicklung eines Standardproblems der integrierten Planung und erfolgt in Abschnitt 4.2. Diese formale Formulierung bildet somit eine wichtige Grundlage und wird im weiteren Verlauf der Arbeit erneut aufgegriffen.

2.3 Überblick über Lösungsverfahren

In den letzten Abschnitten wurden die theoretischen Grundlagen zur Betrachtung der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung auf operativer Ebene gelegt. Dazu wurde unter anderem das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung eingeführt. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über Verfahren zur Lösung des Standardproblems der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung gegeben. Anhand dieses Überblicks werden in den nachfolgenden Abschnitten einige Lösungsverfahren detailliert vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit angewendet werden.

Das Standardproblem der Produktionsplanung ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem und NP-schwer (vgl. [Garey et al., 1976], [Lenstra et al., 1977] und [Lenstra und Rinnooy Kan, 1979]). Verfahren zur Lösung dieses Standardproblems werden grundsätzlich in exakte Lösungsverfahren und Näherungsverfahren (Heuristiken) unterschieden. Exakte Lösungsverfahren ermitteln eine globaloptimale Lösung und eignen sich nur für kleine Problemgrößen [Kämpf, 2006]. Dies ist dadurch begründet, dass der Rechenaufwand bei NP-schweren Problemen mit wachsender Problemgröße überproportional stark ansteigt. Daher können Produktionsplanungsprobleme nur bis zu einer gewissen Problemgröße in vertretbarer Zeit exakt gelöst werden. Dennoch kommt den exakten Lösungsverfahren eine große Bedeutung zu, da anhand der optimalen Lösung kleiner Probleminstanzen die Lösungsgüte von Heuristiken bewertet werden kann [Baker und Trietsch, 2009]. Zu diesen exakten Lösungsverfahren zählen beispielsweise das Branch-and-Bound Verfahren sowie die dynamische Programmierung (vgl. [Jain und Meeran, 1998] und [Grünert und Irnich, 2005]). Zur Lösung größerer Probleminstanzen werden Heuristiken eingesetzt. Diese liefern zwar ein hinreichend gutes Ergebnis in vertretbarer Zeit, können aber nicht garantieren, dass dieses Ergebnis das globale Optimum darstellt [Ohrt, 2008]. Lösungsverfahren für das Produktionsplanungsproblem lassen sich entsprechend der Abbildung 7 weiter untergliedern (vgl. [Blazewicz et al., 1996], [Jain und Meeran, 1998], [Arisha et al., 2001], [Evers, 2002], [Mathirajan und Sivakumar, 2006], [Karger et al., 2010] und [Pinedo, 2012]). Darüber hinaus sind in dieser Abbildung exemplarisch einige Verfahren als Vertreter der jeweiligen Kategorie angegeben. Nachfolgend wird auf die Heuristiken näher eingegangen, da diese im weiteren Verlauf der Arbeit zur Lösung dieses Teilproblems im Zuge der integrierten Planung herangezogen werden.

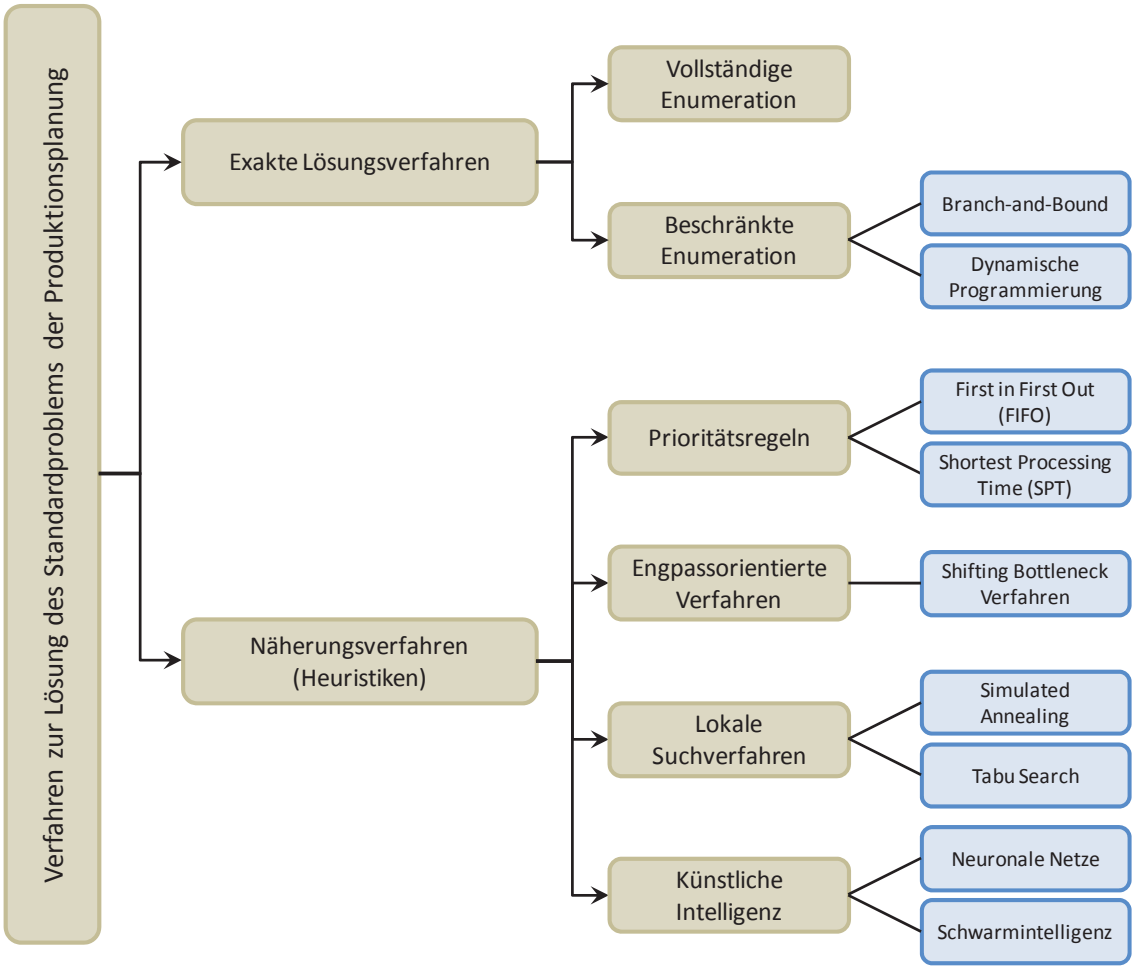


Abbildung 7: Strukturierung von Verfahren zur Lösung von Produktionsplanungsproblemen

Heuristiken lassen sich in vier Kategorien unterteilen: Prioritätsregeln, engpassorientierte Verfahren (Bottleneck), lokale Suchverfahren und Verfahren, die Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz verwenden [Jain und Meeran, 1998]. Prioritätsregeln werden wegen ihrer einfachen Anwendung und ihrer geringen Lösungsdauer häufig eingesetzt (vgl. [Kutanoglu und Sabuncuoglu, 1999] und [Baker und Trietsch, 2009]). Dabei wird jedem Auftrag eine Priorität zugeordnet, die auf Basis verschiedener Kriterien ermittelt wird. Anschließend wird der Auftrag mit der höchsten Priorität zuerst bearbeitet. Die Kriterien sowie die Art der Ermittlung einer Priorität für einen Auftrag sind dabei höchst unterschiedlich, was sich durch die hohe Anzahl existierender Prioritätsregeln ausdrückt. Da die Erstellung eines Überblicks über die vorhandenen Prioritätsregeln nicht im Fokus dieser Arbeit steht, soll an dieser Stelle ein Verweis auf die Literatur ausreichen (vgl. [Panwalkar und Iskander, 1977], [Blackstone et al., 1982], [Ramasesh, 1990] und [Jayamohan und Rajendran, 2000]).

Engpassorientierte Verfahren zerlegen das Gesamtproblem zunächst in kleinere Teilprobleme, identifizieren anschließend den Engpass und lösen dieses Engpassproblem bevor der Gesamtplan erneut betrachtet wird [Jain und Meeran, 1998]. Das bekannteste engpassorientierte Verfahren ist die von Adams et al. (1988) entwickelte Shifting Bottleneck Heuristik, die als Grundlage für die Entwicklung von weiteren Lösungsverfahren diente.

Lokale Suchverfahren durchsuchen ausgehend von einer zulässigen Lösung die Nachbarschaft dieser Lösung, die sich durch marginale Änderungen der Startlösung ergibt, nach weiteren

Verbesserungsmöglichkeiten [Choi, 2000]. Dazu wird iterativ eine Startlösung minimalen Veränderungen unterzogen und deren Leistungskennzahlen mit denen der ursprünglichen Startlösung verglichen. Hat sich eine Verbesserung der Leistungskennzahlen ergeben, wird diese Lösung als neues lokales Optimum definiert und bildet den Ausgangspunkt für die nächste Iteration [Choi, 2000]. Die Vielzahl lokaler Suchverfahren ergeben sich unter anderem durch Unterschiede bei der Definition einer Nachbarschaft sowie durch das Zulassen einer schlechteren als der aktuell besten Lösung innerhalb einer Iteration zur Überwindung lokaler Optima (threshold accepting nach Dueck und Scheuer (1990) sowie Moscato und Fontanari (1990)). Für einen Überblick über lokale Suchverfahren, zu denen darüber hinaus das Simulated Annealing (vgl. [Kirkpatrick et al., 1983], [Kirkpatrick, 1984] und [van Laarhoven et al., 1992]) oder das Tabu Search Verfahren (vgl. [Glover und Laguna, 1997]) zählen, sei auf die Literatur verwiesen (vgl. [Vaessens et al., 1994], [Choi, 2000] und [Gendreau und Potvin, 2010]). Lokale Suchverfahren sowie Verfahren der künstlichen Intelligenz, auf die nachfolgend kurz eingegangen wird, werden auch als Metaheuristiken bezeichnet.

Verfahren der künstlichen Intelligenz bedienen sich biologischer Prinzipien zur Lösung von Problemen und wenden diese auf verschiedene Anwendungsfelder an [Jain und Meeran, 1998]. Im Bereich der Produktionsplanung kommen beispielsweise der Ameisenalgorithmus sowie neuronale Netze oder genetische Algorithmen zur Anwendung [Pinedo, 2012]. Der Ameisenalgorithmus wurde zunächst auf Transportplanungsprobleme angewendet und anschließend auf Produktionsplanungsprobleme übertragen (vgl. [Dorigo et al., 1996]). Dabei soll mit Hilfe eines Multi-Agenten-Systems der kürzeste Weg eines Auftrags durch ein Produktionssystem gefunden werden, wobei jeder Auftrag durch einen Agenten repräsentiert wird [Zäpfel und Braune, 2005]. Für einen Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Ameisenalgorithmen sei auf die Literatur verwiesen (vgl. [Cordon et al., 2002], [Blum, 2005] und [Shtovba, 2005]).

Neuronale Netze zählen ebenfalls zu den bioinspirierten Verfahren und lehnen sich strukturell an Nervensysteme an [Jain und Meeran, 1998]. Diese sind durch ihre vernetzten Strukturen in der Lage, eine Vielzahl von Informationen parallel zu verarbeiten und besitzen darüber hinaus die Fähigkeit zu Lernen. Aus diesem Grund werden neuronale Netze unter anderem zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme wie der Produktionsplanung eingesetzt [Akyol und Bayhan, 2007]. Die Literatur hält eine Übersicht über die Anwendung neuronaler Netze im Bereich der kombinatorischen Optimierung (vgl. [Looi, 1992] und [Smith, 1999]) sowie im Bereich der Planung (vgl. [Huang und Zhang, 1994] und [Sabuncuoglu, 1998]) bereit.

Genetische Algorithmen basieren auf dem Prinzip der natürlichen Evolution. Bei der Anwendung auf Produktionsplanungsprobleme werden in jeder Generation eine Anzahl unterschiedlicher Lösungen (Individuen) erzeugt und mit Hilfe einer Funktion (Fitnessfunktion) bewertet (vgl. [Jain und Meeran, 1998]). Diese Lösungsmenge wird durch die Kreuzung guter Lösungen, durch Mutation (geringfügige Veränderung einer bestehenden Lösung) oder durch Selektion (Auswahl der besten Lösungen als Ausgangsbasis für die nächste Generation) erzeugt [Domschke und Drexl, 2011]. Genetische Algorithmen wurden 1985 erstmals auf ein Produktionsplanungsproblem angewendet (vgl. [Davis, 1985]).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass es kein Lösungsverfahren für das Standardproblem der Produktionsplanung gibt, das allen anderen Verfahren vollständig überlegen ist. Die Unterschiedlichkeit der Lösungsverfahren verlangt zur Identifikation eines geeigneten Verfahrens eine Prüfung verschiedener Kriterien in Abhängigkeit von den Charakteristika der Problemstellung wie beispielsweise der Anwendbarkeit und der Lösungsgüte sowie der Lösungsdauer. Auf Grund

dieser Tatsache werden im folgenden Abschnitt nur die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Verfahren zur Lösung des Standardproblems der Produktionsplanung detailliert vorgestellt.

2.4 Ausgewählte Lösungsverfahren der Produktionsplanung

Im Folgenden werden aus der Vielzahl der zur Lösung von JJSP entwickelten Verfahren nur diejenigen vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Anwendung kommen. Dabei liegt der Schwerpunkt bei der Auswahl der hier vorgestellten Lösungsverfahren nicht darin, für das ausgewählte Szenario ein exaktes oder das beste heuristische Lösungsverfahren zu finden. Vielmehr liegt der Auswahlschwerpunkt darin, Lösungsverfahren zu identifizieren, die eine hohe Lösungsgüte und eine geringe Lösungsdauer aufweisen. Beide Kriterien sind im Hinblick auf die weitere Arbeit relevant. Eine hohe Lösungsgüte ist gleichbedeutend damit, dass durch die Anwendung dieses Lösungsverfahrens die Anforderungen dieses Teilproblems so gut wie möglich umgesetzt wurden und das folglich die Zielkriterien in sehr hohem Maße erfüllt werden können. Die durch die ausgewählten Lösungsverfahren erzielten Ergebnisse des Teilproblems werden anschließend als Ausgangsbasis für die spätere Integration verwendet, in deren Verlauf diese Teilergebnisse modifiziert werden. In diesem Zusammenhang ist auch die Lösungsdauer ein relevantes Kriterium, da im Zuge der Ermittlung einer integrierten Gesamtlösung zunächst die beiden Teilprobleme Produktions- und Transportplanung gelöst werden müssen und darüber hinaus die sich anschließende Integration ebenfalls eine entsprechende Zeit zur Lösungsfindung benötigt. Somit ist die Lösungsdauer sowohl bei der Betrachtung der einzelnen Teilprobleme als auch bei der Betrachtung der Integration ein wichtiges Kriterium für die Auswahl geeigneter Lösungsverfahren.

Prioritätsregeln erfüllen die genannten Kriterien, indem sie bei überschaubarem Implementierungsaufwand und einer akzeptablen Lösungsdauer sehr gute Lösungen erzeugen [Ho und Tay, 2005]. Darüber hinaus sind sie wegen ihrer einfachen Handhabung, der geringen Lösungsdauer und relativ hohen Lösungsgüte in der praktischen Anwendung weit verbreitet (vgl. [Rose, 2002] und [Jayamohan und Rajendran, 2000]). Folglich wurden in der Vergangenheit einige hundert Prioritätsregeln entwickelt, die nach Holthaus (1996) und Evers (2002) anhand verschiedener Kriterien unterteilt werden können [Junge, 2007]. Dennoch gibt es keine Prioritätsregel, deren Leistungsfähigkeit unabhängig vom Szenario und von den Zielkriterien alle anderen entwickelten Prioritätsregeln dominiert (vgl. [Haupt, 1989] und [Rajendran und Holthaus, 1999].

Prioritätsregeln ordnen einem Job nach bestimmten Regeln einen (Prioritäts-)Wert zu. Anschließend werden alle Jobs anhand dieses Wertes geordnet und dadurch in eine Reihenfolge gebracht [Kim, 1990]. Je nach verwendeter Prioritätsregel werden die Jobs in einer Warteschlange vor einer Bearbeitungsstation mit den höchsten bzw. geringsten Werten zuerst bearbeitet.

Nachfolgend werden Prioritätsregeln vorgestellt, die in Leistungsvergleichen von Prioritätsregeln untereinander sehr gute Ergebnisse bei der Betrachtung verschiedener Zielfunktionen erzielt haben und daher die erwähnten Eigenschaften in besonderem Maße erfüllen. Dabei wurden in der Literatur zwei unterschiedliche Schwerpunkte für die durchgeführten Leistungsvergleiche identifiziert. Zum einen können Prioritätsregeln ausschließlich in Bezug auf Prozesskennzahlen wie beispielsweise die Durchlaufzeit oder Terminabweichungen bewertet werden (vgl. [Panwalkar und Iskander, 1977], [Blackstone et al., 1982], [Haupt, 1989], [Kim, 1990], [Waikar et al., 1995], [Holthaus und Rajendran, 1997], [Holthaus und Rajendran, 1997a], [Mattfeld und Bierwirth, 1998], [Rajendran und Holthaus, 1999], [Dominic et al., 2004], [Mizrak und Bayhan, 2006] und [Sels et al., 2011]). Zum anderen

können neben den Prozesskennzahlen auch ökonomische Kriterien zum Leistungsvergleich herangezogen werden (vgl. [Aggarwal et al., 1973], [Stefenelli, 2000], [Jayamohan und Rajendran, 2004], [Kemppainen, 2005], [Neidhardt, 2007] und [Barman und Lisboa, 2010]). Als Ergebnis dieser von den verschiedenen Autoren durchgeführten Leistungsvergleiche kann festgehalten werden, dass bisher keine Prioritätsregel existiert, die stets alle anderen Prioritätsregeln dominiert (vgl. [Blackstone et al., 1982], [Haupt, 1989] und [Neidhard, 2007]). Vielmehr besteht eine Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit einer Prioritätsregel vom unterstellten Planungsmodell und vom Optimierungsziel. Für die ausgewählten und nachfolgend vorgestellten Prioritätsregeln konnte in diesen Leistungsvergleichen durchgängig eine hohe Lösungsgüte bei gleichzeitig geringer Lösungsdauer nachgewiesen werden. Dies ist darüber hinaus ein Kennzeichen für die Flexibilität und Robustheit der ausgewählten Prioritätsregeln, die jeweils eine Kombination einfacher und bereits bekannter Prioritätsregeln darstellen. In den untersuchten Leistungsvergleichen konnte gezeigt werden, dass kombinierten Prioritätsregeln im Allgemeinen eine höhere Lösungsgüte aufweisen.

2.4.1 Prioritätsregel Earliest Due Date (EDD)

Die EDD-Regel stellt eine einfache Prioritätsregel dar, die als nächsten zu bearbeitenden Auftrag denjenigen aus einer Warteschlange aus wählt, dessen Fälligkeitstermin am dringendsten ist. Dazu werden alle Aufträge in einer Warteschlange beginnend mit dem dringendsten Auftrag in absteigender Reihenfolge der Fälligkeitstermine geordnet. Ziel dieser Regel ist es damit, die Summe der Verspätungen über alle Aufträge zu minimieren. [Brucker, 2007]

2.4.2 Prioritätsregel PT+WINQ+SL

Ausgangspunkt für die Entwicklung dieser Prioritätsregel durch Holthaus und Rajendran (1997a) waren die Ergebnisse zahlreicher Simulationsstudien. Bei diesen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die SPT-Regel (SPT - shortest processing time first) sehr gute Lösungen bei hoher Systemeinlastung erzeugt. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass die WINQ-Regel (WINQ – work-in-next-queue) Jobs bevorzugt zu den Bearbeitungsstationen lenkt, bei denen die Länge der Warteschlange am geringsten ist. Durch die Berücksichtigung der Information über die Warteschlangenlänge der nachfolgenden Bearbeitungsstationen wird die Gesamtwartezeit der Jobs verringert. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass durch SL-basierte Prioritätsregeln (SL – slack) die Varianz der Verspätung aller Jobs reduziert werden kann. Mit dem Begriff slack wird dabei die Zeitspanne zwischen dem Fälligkeitstermin (entspricht dem spätest möglichen Fertigstellungszeitpunkt eines Jobs (auch due date genannt (dd_i))) und dem Zeitpunkt, zu dem die Bearbeitung ohne Verzögerungen abgeschlossen werden könnte (entspricht dem frühest möglichen Fertigstellungszeitpunkt), bezeichnet. Der slack wird in diesem Fall als negativer Wert angegeben.

Das Ziel der Arbeit von Holthaus und Rajendran (1997a) war die Kombination der Vorteile dieser drei einzelnen Prioritätsregeln. Aus diesem Grund formulierten sie diese Vorteile als Anforderungen an neu zu entwickelnde Regeln. Zur Erfüllung dieser Anforderungen ist es gelungen, verschiedene Regeln zu entwickeln, die sich jeweils aus der Kombination einfacher Prioritätsregeln ergeben. Für jede der entwickelten Prioritätsregeln gilt, dass sich der Gesamt-Prioritätswerte aus der Addition der Werte der jeweils enthaltenen Prioritätsregeln ergibt. Der Job mit dem geringsten Prioritätswert wird ausgewählt. In einem von diesen Autoren durchgeführten Leistungsvergleich mit den von ihnen entwickelten kombinierten Prioritätsregeln hat sich herausgestellt, dass die PT+WINQ+SL Regel (process time plus work-in-next-queue plus negative slack) den anderen von ihnen entwickelten Regeln überlegen ist. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Regel auch im Vergleich mit

weiteren Prioritätsregeln sehr gute Lösungen erzeugt (vgl. [Kemppainen, 2005], [Mizrak und Bayhan, 2006] und [Sels et al., 2012]). In diesen weiteren Vergleichen hat sich herausgestellt, dass diese Regel die maximale Verspätung sowie die Varianz aller Verspätungen auf einem niedrigen Niveau hält und folglich auch sehr gute Resultate hinsichtlich der Durchlaufzeit erreicht werden können.

Aus formaler Sicht ergibt sich der Prioritätswert $PI_i^{PT+WINQ+SL}(t)$ eines Jobs J zum Zeitpunkt t mit vorgegebenem due date dd_i bei Anwendung der PT+WINQ+SL Prioritätsregel nach folgender Formel:

$$PI_i^{PT+WINQ+SL}(t) = p_{il} + WT_{il+1} + SL_{iO_i}(t) \qquad \forall i \in J,\ \forall l \in M,\ \forall O_i \in O \qquad (5)$$

Dabei errechnet sich der slack nach der Formel:

$$SL_{iO_i}(t) = dd_i - t - \sum_{i=1}^{oi} p_{il} \qquad \forall i \in J,\ \forall l \in M,\ \forall O_i \in O \qquad (6)$$

Da sich nach jeder Stufe ein neuer Wert für den slack ergibt, muss folglich auch nach jeder Stufe ein neuer Prioritätswert bestimmt werden. Es reicht somit nicht aus, zu Beginn der Planungsperiode die Prioritätsregel einmalig anzuwenden.

3 Teilproblem: Transportplanung

In diesem Abschnitt wird das Teilproblem der Transportplanung zunächst allgemein dargestellt. In Analogie zum vorherigen Abschnitt werden im Anschluss die für diese Arbeit relevanten Verfahren der Transportplanung im Einzelnen vorgestellt. Diese Verfahren werden im weiteren Verlauf bei der Entwicklung des integrierten Lösungsverfahrens verwendet oder kommen als Vergleichsverfahren zum Einsatz.

3.1 Grundlagen der Transportplanung

3.1.1 Planung und Zielsystem im Kontext des Transports

Die Transportplanung umfasst im Allgemeinen das Design von Transportnetzen auf strategischer Ebene sowie die taktische und operative Planung und Steuerung der darin ablaufenden Prozesse [Arnold et al., 2008]. Da der Schwerpunkt der Betrachtungen in dieser Arbeit auf der Planung operativer Prozesse liegt, beschränkt sich das hier untersuchte Transportplanungsproblem auf den Bereich der Tourenplanung. Die Tourenplanung stellt das meist beachtete Planungsproblem auf operativer Ebene dar. Trotz dieses inhaltlichen Unterschiedes werden in dieser Arbeit die Begriffe Transportplanung und Tourenplanung synonym verwendet. Dies geschieht in Anlehnung an die in der englischsprachigen Literatur häufig verwendeten Begriffe des transport scheduling oder transportation planning. In Analogie zur oben gegebenen Definition des Begriffs Planung bezieht sich die Aufgabe der Tourenplanung auf die Zuordnung von Ressourcen (Transportkapazitäten) zu Aufträgen (Transportaufträgen) [Grünert und Irnich, 2005].

Das in der Realität zugrunde liegende Netz aus Depots, Kundenstandorten und Verkehrswegen wird mit Hilfe der Graphentheorie in ein Netz aus Knoten und Kanten umgeformt. In Abhängigkeit von der räumlichen Struktur dieses Netzes ergeben sich zwei unterschiedliche Problemtypen [Arnold et al., 2008]. Dabei handelt es sich um knotenorientierte Probleme einerseits und kantenorientierte Probleme andererseits. Bei knotenorientierten Problemen werden Depots sowie Kundenstandorte als Menge von Knoten und Verkehrswege als Menge von Kanten dargestellt, wobei die Kanten die Knoten miteinander verbinden [Grünert und Irnich, 2005]. Ziel dieser knotenorientierten Probleme ist die Festlegung einer möglichst optimalen Reihenfolge, in der die Knoten innerhalb einer Tour angefahren werden. Dieses Reihenfolgeproblem wird in der Literatur als das klassische Travelling Salesman Problem (TSP) bezeichnet [Grünert und Irnich, 2005a]. Das TSP stellt einen Spezialfall der Tourenplanung dar, da das Ergebnis eine einzige Rundreise/Tour darstellt. Diese soll so gestaltet sein, dass die dabei zurückzulegende Gesamtstrecke oder die Reisedauer oder die Kosten minimiert werden [Zimmermann und Stache, 2001]. Beim klassischen TSP ist die Wahl des Startknotens unbedeutend, die Kapazität der Fahrzeuge unbeschränkt (vgl. [Suhl und Mellouli, 2013] und [Kämpf, 2006]) und die Kundenbedarfe irrelevant [Richter, 2005]. Durch diese Vereinfachungen ist es möglich, das TSP auch für größere Probleminstanzen in polynomieller Zeit exakt zu lösen [Kämpf, 2006]. Dennoch ist das TSP im Allgemeinen ein NP-schweres Problem [Grünert und Irnich, 2005], für dessen Lösung in der Regel Heuristiken verwendet werden. Die überwiegende Mehrzahl der Anwendungsfälle entsprechen einem knotenorientierten Problem, die damit die kantenorientierten Probleme hinsichtlich ihrer Häufigkeit deutlich übertreffen. Bei einem kantenorientierten Problem entsprechen die Kunden ganzen Kanten, was sich am Beispiel des Briefträger-Problems verdeutlichen

lässt [Arnold et al., 2008]. Dabei befinden sich auf jeder Kante eine Vielzahl von Kunden. Auch das kantenorientierte Problem zählt zu den NP-schweren Planungsproblemen.

In Analogie zur Produktionsplanung, dessen Zielsystem auch auf die häufig zwischen Produktion und Transport angesiedelte Lagerung übertragen werden kann [Wiendahl et al., 2006], lässt sich auch für das Teilproblem der Transportplanung ein Zielsystem ableiten. Dieses Zielsystem, das in Abbildung 8 dargestellt ist, weist einen zum Zielsystem der Produktionsplanung identischen Aufbau auf, enthält aber teilweise andere Zielkriterien. Hinsichtlich der Lieferzeit besteht das Ziel der Transportplanung in der Minimierung der insgesamt zu fahrenden Strecke und der damit einhergehenden Transportzeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher Nebenbedingungen [Vahrenkamp et al., 2012]. Ein weiterer Unterschied ergibt sich für die Kapitalbindungskosten, deren Zielkriterien die Minimierung der Leerfahrten und Bestände sind. Letztere entstehen unter anderem durch die Zwischenlagerung bei gebrochenen Transporten oder bei Umschlagsaktivitäten. Sowohl für die Lagerung der Bestände als auch für die Durchführung der Umschlagsaktivitäten werden entsprechende Ressourcen benötigt. Dadurch wird Kapital gebunden, das somit direkten Einfluss auf die Höhe der Logistikkosten hat.

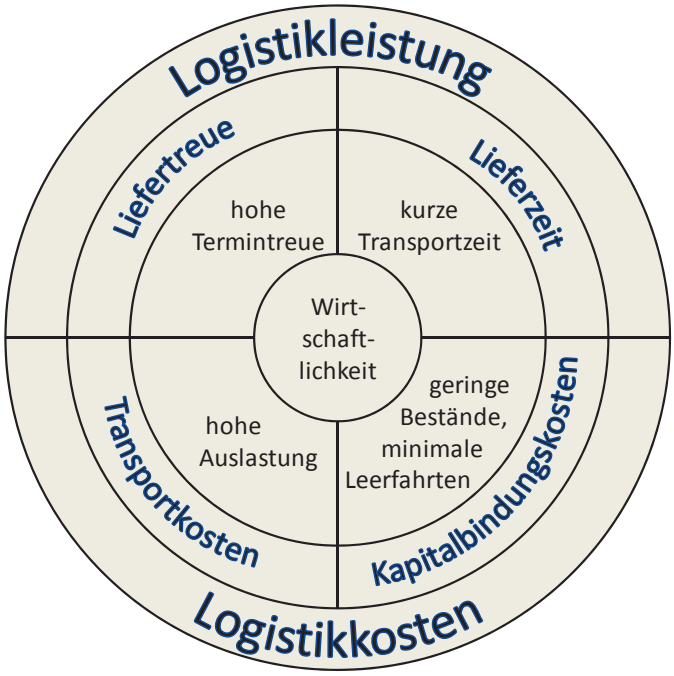


Abbildung 8: Zielsystem der Transportplanung

3.1.2 Einordnung der Transportplanung in die Logistik

Logistik ist eine Querschnittsfunktion im Unternehmen, die sich am Prozessgedanken orientiert und daher alle funktionalen Bereiche eines Unternehmens umfasst [Arnold et al., 2008]. Die Transportplanung stellt einen Teilbereich der Logistik dar, der prinzipiell in allen Unternehmensbereichen wiederzufinden ist. In der Beschaffungslogistik ist der Transport von Rohstoffen und Zukaufteilen zur Produktionsstätte interessant. Innerbetriebliche oder werksübergreifende Transporte stehen im Fokus der Transportplanung im Bereich der Produktionslogistik. Allerdings kommt der Transportplanung im Rahmen der Distributionslogistik die größte Bedeutung zu im Vergleich mit den anderen funktionalen Bereichen [Vahrenkamp et al., 2012]. Dies liegt darin begründet, dass dieser Teilbereich die Unternehmen mit ihren Kunden verbindet. In dieser Funktion beinhaltet die Distributionslogistik die Planung, Steuerung und

Überwachung der Material- und Informationsflüsse zwischen den produzierenden Unternehmensbereichen und den Kunden des Unternehmens [Arnold et al., 2008]. Dabei gliedert sich die Distributionslogistik in die Bereiche Auftragsabwicklung und Lagerhaltung sowie Transport, die im Allgemeinen und unabhängig vom betrachteten Funktionsbereich auch als logistische Kernleistungen bezeichnet werden [Gleißner und Femerling, 2008]. Die Aufgaben der Auftragsabwicklung bestehen in der Erfassung und Aufbereitung sowie in der Bereitstellung und Dokumentation von Auftragsdaten. Darüber hinaus obliegt der Auftragsabwicklung die Kommunikation mit den produzierenden Unternehmensbereichen und den Kunden [Gleißner und Femerling, 2008]. Der Bereich Lagerhaltung beinhaltet zum einen die Lagerung selbst und zum anderen angrenzende Aufgaben wie den Umschlag und die Verpackung sowie die Kommissionierung von Gütern [Arnold et al., 2008]. Der Bereich Transport umfasst die Transportplanung und -ausführung sowie alle Aktivitäten zur Be- und Entladung von Transportmitteln. Die Abbildung 9 bildet die Einordnung der Transportplanung in die Logistik im Allgemeinen und in die Distributionslogistik im Speziellen ab.

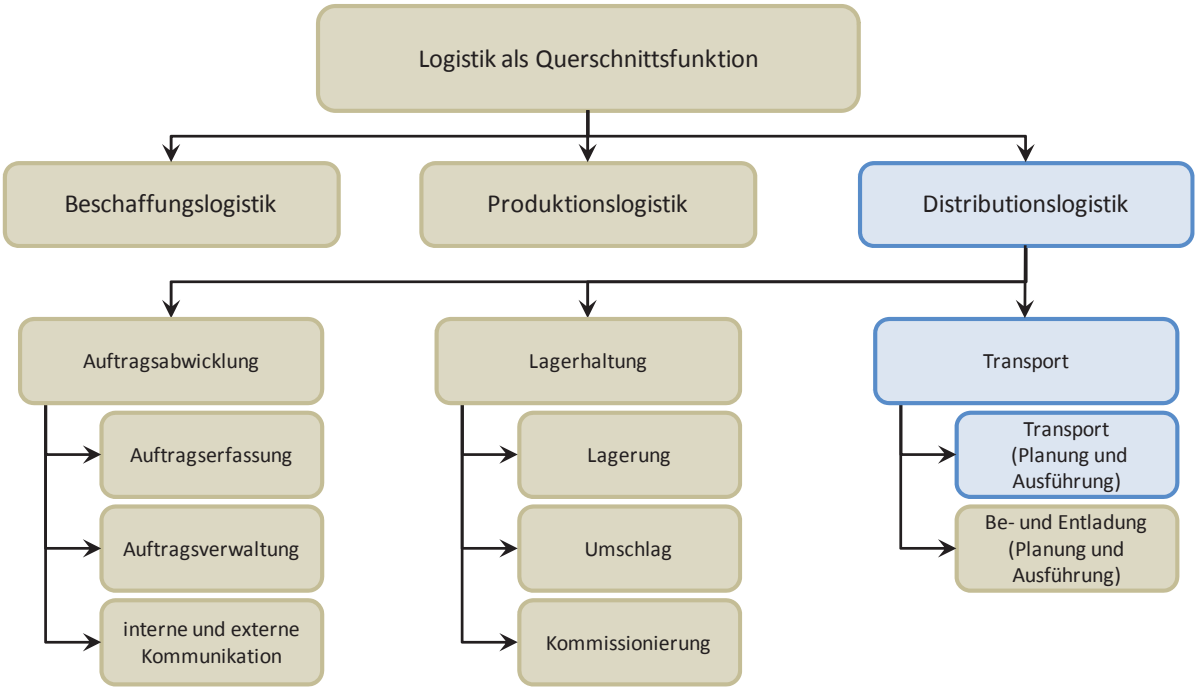


Abbildung 9: Einordnung der Transportplanung in die Logistik

3.1.3 Dynamik und Determiniertheit bei der Transportplanung

Transportplanungsprobleme lassen sich bezüglich der zeitlichen Ankunft der Transportaufträge und hinsichtlich des Informationsstands über relevante Planungsgrößen zum Zeitpunkt der Planung unterscheiden. Analog zu den diesbezüglichen Ausführungen zu Produktionsplanungsproblemen lassen sich statische von dynamischen sowie deterministische von stochastischen Planungsproblemen unterscheiden. Liegt zum Planungszeitpunkt der gesamte Auftragsbestand vor, handelt es sich um ein statisches, andernfalls um ein dynamisches Transportplanungsproblem.

Modelle der Transportplanung sind vollständig determiniert, wenn zum Planungszeitpunkt alle relevanten Planungsinformationen bekannt und eindeutig bestimmt sind. Im Zuge der Transportplanung sind beispielsweise Informationen über Liefertermine und Transportzeiten sowie die zur Verfügung stehenden Transportkapazitäten wesentlich für die Planung. Sollten diese

Informationen weder zum Planungszeitpunkt noch während des Planungszeitraums vollständig für die Planung zur Verfügung stehen, handelt es sich um ein stochastisches Transportplanungsmodell. In diesem Fall werden statistische Angaben für den Planungsprozess verwendet.

Das in dieser Arbeit betrachtete Transportplanungsproblem ist statisch-deterministisch. Bei entsprechender Erweiterung des unterstellten Planungsmodells kann dieses in ein dynamisch-stochastisches Modell umgewandelt werden.

3.1.4 Klassifikation von Planungsmodellen der Transportplanung

Die Tourenplanung umfasst eine ganze Reihe von Planungsproblemen, die durch verschiedene Modellannahmen gekennzeichnet sind (vgl. [Rieck, 2008] und [Arnold et al., 2008]). Diese Unterschiede betreffen beispielsweise die gleichzeitige Auslieferung und Abholung in einer Tour (Pickup and Delivery-Probleme) oder Zeitfenster, innerhalb derer die Kunden angefahren werden müssen (Transportation Scheduling with Time Windows) sowie die Belieferung der Kunden aus mehreren Depots (Multi-Depot-Probleme) [Vahrenkamp et al., 2012]. Ein Überblick über diese und weitere Problemstellungen bei der Tourenplanung wird von verschiedenen Autoren gegeben (vgl. [Marinakis und Migdalas, 2002], [Toth und Vigo, 2002] und [Golden et al., 2008]). Auf Grund dieser unterschiedlichen Planungsmodelle ist die Kenntnis der charakteristischen Modellparameter wesentlich für die Beurteilung, ob sich ein Lösungsverfahren für die vorliegende Problematik eignet und welche Leistungsfähigkeit es im Vergleich mit anderen Lösungsverfahren aufweist.

Analog zur Produktionsplanung wurden auch für das Teilproblem der Transportplanung eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Klassifikation entwickelt, die dem Nutzer einen Überblick über die Modellcharakteristika vermitteln sollen (vgl. [Bodin und Golden, 1981], [Desrochers et al., 1990], [Laporte und Osman, 1995], [Psaraftis, 1995] und [Baldacci et al., 2008]). Diese Klassifikationsschemata sind jedoch auf Grund der vielfältigen in der Literatur vorhandenen Modelle nicht ausreichend. Im folgenden wird eine Klassifikation vorgestellt, die an Eksioglu et al. (2009) angelehnt ist und im Rahmen dieser Arbeit modifiziert wurde. Dies ist dadurch begründet, dass nach der hier vertretenen Auffassung nicht alle dort angegebenen Merkmale notwendig sind, um ein Planungsmodell zu charakterisieren. Beispielsweise ist es für die Charakterisierung eines Planungsmodells irrelevant, ob die zugrunde liegenden Daten aus einem realen Szenario stammen oder künstlich erzeugt wurden. Dies stellt lediglich eine zusätzliche Information dar, die dazu dient, die Nähe des Planungsmodells zur praktischen Anwendung einzuschätzen. Aus dieser Information kann jedoch nicht abgeleitet werden, ob sich ein auf Basis dieses Modells entwickeltes Lösungsverfahren für das aktuell betrachtete Problem eignet. Darüber hinaus ist für die reine Beschreibung eines Planungsmodells das durch den jeweiligen Autor angewendete Lösungsverfahren ebenfalls irrelevant für Klassifikation eines Transportplanungsmodells. Die von Eksioglu et al. (2009) entwickelte Klassifikation geht somit über die Klassifizierung eines Planungsmodells hinaus.

In die hier verwendete Klassifikation wurden zusätzliche Aspekte als Modellparameter aufgenommen, die in der Klassifikation nach Eksioglu et al. (2009) bisher nicht berücksichtigt wurden. Dies betrifft einige der Liefercharakteristika nach Chen (2010). Dazu zählen beispielsweise die Betrachtung einer Routenbildung im Gegensatz zur Direktbelieferung oder auftragsbezogene Kapazitätsrestriktionen, wonach ein Transportfahrzeug nur Güter transportieren darf, die zu einer festgelegten Anzahl an Aufträgen gehören. Die Abbildung 10 stellt die Modellparameter zur Klassifikation von Transportplanungsmodellen sowie mögliche Optimierungsziele dar. Für die Ausprägungen der einzelnen Modellparameter sei auf die angegebene Literatur bzw. den Anhang verwiesen.

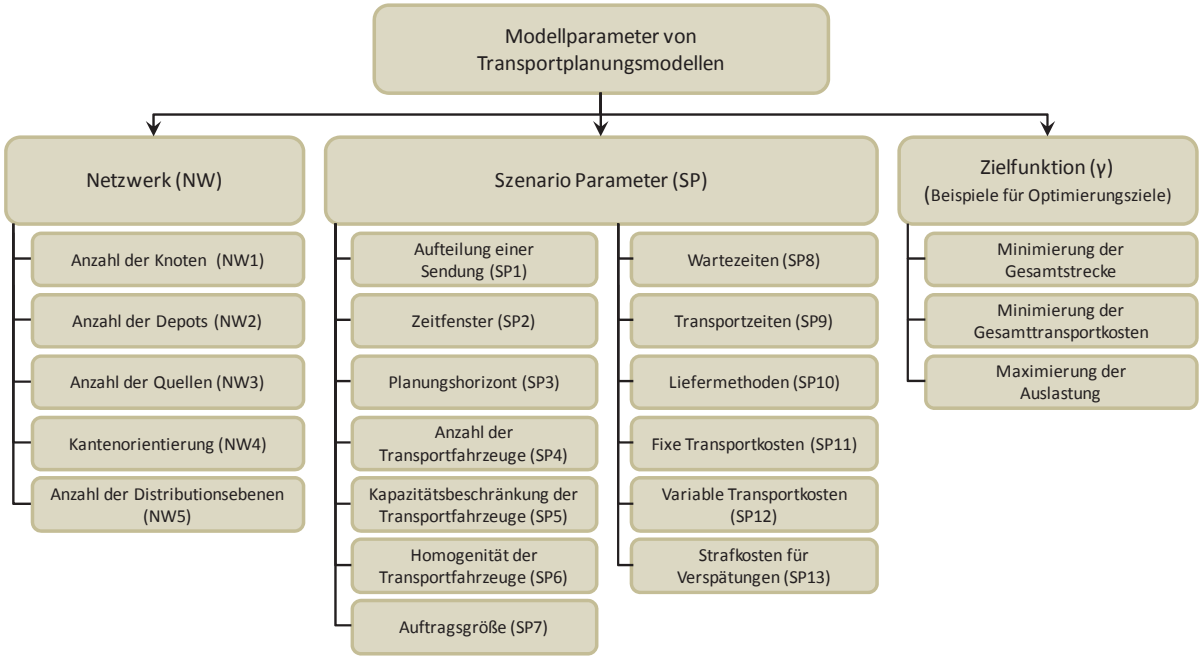


Abbildung 10: Überblick über Modellparameter von Transportplanungsmodellen

3.2 Das Standardproblem der Transportplanung

Bei allen Tourenplanungsproblemen geht es im Kern darum, dass eine definierte Anzahl an Kunden durch eine Anzahl von Fahrzeugen mit beschränkten Kapazitäten mit den jeweiligen nachgefragten Mengen von mindestens einem Depot aus beliefert werden soll [Vahrenkamp et al., 2012]. In der Literatur wird dieser Kern als das Standardproblem der Tourenplanung (vgl. [Arnold et al., 2008]) oder als das klassische Transportproblem (vgl. [Domschke und Drexl, 2011]) bezeichnet. Im Standardproblem der Tourenplanung werden gleichartige Fahrzeuge mit identischer und begrenzter Kapazität sowie symmetrische Entfernungen und geschlossene Touren unterstellt. Letzteres bedeutet, dass eine Tour am Depot beginnt und endet [Arnold et al., 2008]. Diese Beschreibung entspricht dem in der englischsprachigen Literatur verwendeten Begriff des Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) [Cordeau et al., 2007].

Das Standardproblem der Tourenplanung besteht aus einem Zuordnungsproblem und aus einem Reihenfolgeproblem (vgl. [Wenger, 2010] und [Arnold et al., 2008], wobei Letzteres dem TSP entspricht. Beim Zuordnungsproblem geht es um die eindeutige Zuweisung von Knoten zu Touren. Das bedeutet, dass jeder Knoten genau einer Tour zugeordnet ist und jede Tour nur Knoten enthält, die in keiner anderen Tour enthalten sind [Domschke und Drexl, 2011]. Das Standardproblem der Tourenplanung lässt sich formal wie folgt beschreiben (vgl. [Dantzig und Ramser, 1959], [Toth und Vigo, 2002], [Kämpf, 2006] und [Cordeau et al., 2007]):

Grundlage für die Beschreibung des Standardproblems der Tourenplanung bildet ein bewerteter und gerichteter Graph $G=(V,E)$ mit der Knotenmenge $V=H\cup\{0\}$ sowie der Kantenmenge $E=(\{0\}\times H)\cup I\cup(H\times\{0\})$, wobei $I\subset H\times H$ die Menge der verbindenden Kanten bezeichnet. Ausgehend von einem zentralen Depot müssen alle Knoten $e,f\in H=\{1,2,\ldots,h\}$ mit den Bedarfsmengen d_e eines homogenen Gutes beliefert werden. Die Belieferung erfolgt mittels v

identischer Transportfahrzeuge, welche eine maximale Transportkapazität von $\kappa_{\max}^{transp}$ besitzen. Das Ziel ist die Minimierung der Transportkosten, wobei $c_{ef} \geq 0$ die Kosten, unabhängig von der transportierten Menge, für den Transport eines Gutes vom Knoten e zum Knoten f mit $0 \leq e, f \leq n$ bezeichnet. Mit Hilfe der Binärvariable a_{ef} wird dabei ausgedrückt, ob die Kante zwischen dem Knoten e und dem Knoten f bereits ein Mal genutzt wurde (siehe Ausdruck (12)). Weiterhin ist zu beachten, dass die logistischen Objekte einer Ladung nicht beliebig teilbar sind und somit die Anzahl b_e der e zu ladenden Objekte somit nur ganzzahlig sein kann (siehe Ausdruck (13)). Daraus ergibt sich ein Optimierungsproblem, dass sich wie folgt mathematisch ausdrücken lässt:

Zielfunktion (γ):

$$\min \sum_{(e,f)\in E} c_{ef} a_{ef} \tag{7}$$

Nebenbedingungen:

$$\sum_{f\in H} a_{f0} + \sum_{f\in H} a_{0f} = 2\nu \tag{8}$$

$$\sum_{f\in H} a_{fe} + \sum_{f\in H} a_{ef} = 2 \qquad \forall e \in H \tag{9}$$

$$0 \leq b_e \leq \kappa_{\max}^{transp} \qquad \forall e \in H \tag{10}$$

$$0 < d_e \leq \kappa_{\max}^{transp} \qquad \forall e \in H \tag{11}$$

$$a_{ef} \in \{0,1\} \qquad \forall (e,f) \in E \tag{12}$$

$$b_e \text{ ganzzahlig} \qquad \forall e \in H \tag{13}$$

$$c_{ef} \geq 0 \qquad \forall (e,f) \in H \tag{14}$$

Mit Hilfe der Nebenbedingungen werden die genannten Restriktionen ausgedrückt. Dazu zählt, das jede Tour am Depot beginnt und endet (siehe Gleichung (8)) und dass jeder Knoten in genau einer Tour enthalten ist (siehe Gleichung (9)) . Darüber hinaus wird durch die Gleichung (9) sichergestellt, dass jeder Knoten in einer Tour nur genau ein Mal angefahren wird. Die Ausdrücke (10) und (11) beschreiben, dass die Kapazität der Transportfahrzeuge begrenzt ist und größer als die in einem Knoten nachgefragte Menge. Durch den Ausdruck (14) wird sichergestellt, dass die Kosten für den Transport von Knoten e zum Knoten f positiv sind und folglich auch die Summen positiv sind (Nichtnegativitätsbedingung).

3.3 Überblick über Lösungsverfahren

In den letzten Abschnitten wurden die theoretischen Grundlagen zur Betrachtung der Transportplanung auf operativer Ebene gelegt. Dazu wurde unter anderem das Standardproblem der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung vorgestellt. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über Verfahren zur Lösung des Standardproblems der Transportplanung gegeben. Anhand dieses

Überblicks werden in den nachfolgenden Abschnitten einige Lösungsverfahren detailliert vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit angewendet werden.

Wie bereits erläutert, besteht das Standardproblem der Tourenplanung aus einem Zuordnungsproblem und einem Reihenfolgeproblem [Wenger, 2010]. Auf Grund dessen ist das Standardproblem der Tourenplanung ebenfalls ein kombinatorisches Optimierungsproblem und NP-schwer [Grünert und Irnich, 2005]. Zur Lösung des Standardproblems der Tourenplanung sind in Abhängigkeit von der Problemgröße und der Struktur des betrachteten Problems verschiedene Lösungsverfahren (vgl. [Laporte, 1992]) anwendbar. Dazu zählen beispielsweise der Simplex-Algorithmus (vgl. [Korte und Vygen, 2008] und [Werners, 2013]) oder die Ungarische Methode (vgl. [Kuhn, 1955]). In der Literatur gibt es keine vorherrschende Meinung über die Strukturierung dieser Lösungsmöglichkeiten [Friedrich, 2007]. Vielmehr nehmen verschiedene Autoren eine unterschiedliche Strukturierung der Lösungsverfahren vor (vgl. [Bodin und Golden, 1981], [Bott und Ballou, 1986], [Laporte und Nobert, 1987], [Laporte et al., 2000], [Cordeau und Laporte, 2002], [Rego und Glover, 2007], [Cordeau et al., 2004], [Dangelmaier, 2009], [Laporte, 2009] und [Chauhan et al., 2012]). Im Folgenden wird eine Strukturierung verwendet, die im Wesentlichen der von Kämpf (2006) entspricht und die sich in der Abbildung 11 widerspiegelt. Diese gibt einen Überblick über verschiedene Verfahren zur Lösung des Standardproblems der Tourenplanung, die nachfolgend detailliert erläutert wird.

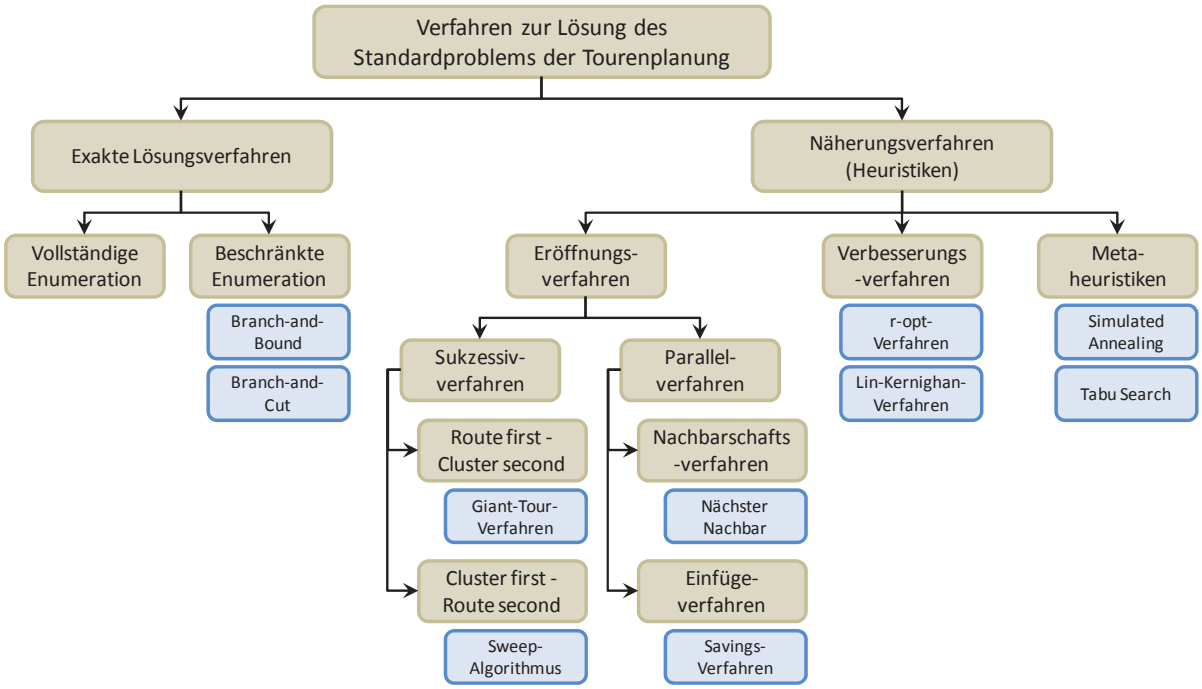


Abbildung 11: Strukturierung von Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen

Analog zur Unterscheidung der Lösungsverfahren für das Produktionsplanungsproblem erfolgt auch im Bereich der Transportplanung eine Unterscheidung zwischen exakten Lösungsverfahren und Heuristiken. Auf Grund der Komplexität des Standardproblems der Tourenplanung kann dieses nur bis zu einer gewissen Problemgröße in vertretbarer Zeit exakt gelöst werden. Auch im Bereich der Transportplanung werden exakte Lösungsverfahren verwendet, um die Lösungsgüte von Heuristiken bewerten zu können [Baker und Trietsch, 2009]. Zu diesen exakten Lösungsverfahren zählen das

Branch-and-Bound sowie das Branch-and-Cut Verfahren (vgl. [Zimmermann und Stache, 2001] und [Grünert und Irnich, 2005]).

Wie bereits bei der Vorstellung von Lösungsverfahren für das Standardproblem der Produktionsplanung erläutert, werden auch bei der Transportplanung zur Lösung größerer Probleminstanzen Näherungsverfahren (Heuristiken) eingesetzt. Diese liefern in vertretbarer Zeit ein hinreichend gutes Ergebnis, ohne sicherstellen zu können, das globale Optimum zu finden [Ohrt, 2008]. Heuristiken für die Transportplanung lassen sich in Eröffnungsverfahren und Verbesserungsverfahren sowie Metaheuristiken unterscheiden [Arnold et al., 2008]. Darüber hinaus gibt es in der Literatur weitere Unterscheidungen, die in dieser Arbeit keine Verwendung finden und daher nicht weiter betrachtet werden (vgl. [Laporte, 1992] und [Domschke und Scholl, 2010]).

Eröffnungsverfahren werden eingesetzt, um eine erste zulässige Lösung zu erzeugen, deren Lösungsgüte anschließend mit Hilfe von Verbesserungsverfahren oder Metaheuristiken weiter erhöht wird. Eröffnungsverfahren lassen sich weiter hinsichtlich der Art, wie die Lösung erzeugt wird, unterscheiden. Bei Sukzessivverfahren werden das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem nacheinander gelöst und auf diese Weise eine Lösung erzeugt. Wird erst das Zuordnungsproblem und anschließend das Reihenfolgeproblem gelöst, wird diese Methodik als „Cluster first - Route second“ bezeichnet [Kämpf, 2006]. Der von Gillet und Miller (1974) entwickelte Sweep-Algorithmus folgt dieser Vorgehensweise. Das Giant-Tour-Verfahren hingegen verfolgt die Stragtegie, zuerst eine möglichst große Tour zu bilden, die alle Knoten beinhaltet [Ohrt, 2008]. Anschließend wird diese unter Beachtung von Kapazitätsrestriktionen in kleinere Touren zerlegt. Durch diese Vorgehensweise wird zuerst das Reihenfolgeproblem und anschließend das Zuordnungsproblem gelöst, was einer „Route first - Cluster second“ Strategie entspricht [Kämpf, 2006].

Im Gegensatz zu Sukzessivverfahren versuchen Parallelverfahren das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem nahezu simultan zu lösen. Die schrittweise Einbeziehung von Knoten oder Kanten ist das wesentliche Merkmal der Parallelverfahren [Kämpf, 2006]. Diese Einbeziehung kann durch zwei verschiedene Vorgehensweisen vollzogen werden. Bei den Nachbarschaftsverfahren werden zu einer bestehenden Tour weitere Knoten oder Kanten nach definierten Kriterien angefügt und abschließend der letzte Knoten mit dem Ausgangspunkt der Tour verbunden. Das Verfahren des nächsten Nachbarn ist ein Vertreter dieser Vorgehensweise. Im Gegensatz dazu wird bei Einfügeverfahren eine Kante einer bestehenden Tour entfernt und ein neuer Knoten eingefügt, der abschließend mit dem Ausgangspunkt der Tour verbunden wird. Nach dieser Vorgehensweise arbeitet beispielsweise das von Clarke und Wright (1964) entwickelte Savings-Verfahren, das auf der Arbeit von Dantzig und Ramser (1959) basiert und das wegen seiner einfachen Anwendbarkeit und hohen Lösungsgüte häufig zur Anwendung kommt [Grünert und Irnich, 2005a].

Verbesserungsverfahren verwenden als Ausgangspunkt eine durch ein Eröffnungsverfahren generierte zulässige Lösung und versuchen, durch lokale Suchverfahren eine bessere Lösung zu erzielen [Kämpf, 2006]. Diese lokalen Suchverfahren werden solange angewendet, bis keine weitere Verbesserung mehr erzielt werden kann [Domschke und Scholl, 2010]. Allerdings wird durch den Einsatz lokaler Suchverfahren nicht der vollständige Lösungsraum sondern nur die Nachbarschaft der bereits gefundenen Lösung nach Verbesserungen durchsucht [Kämpf, 2006]. Die durch den Einsatz von Verbesserungsverfahren erzielten Lösungen entsprechen dadurch nicht zwingend der optimalen Lösung, da eine lokale Suche zu lokalen Optima führt, die nicht mit der globaloptimalen Lösung identisch sein müssen. Aus diesem Grund liefern Verbesserungsverfahren suboptimale Lösungen [Kämpf, 2006]. Je nach Fokus der Betrachtungen können Verbesserungsverfahren in zwei Gruppen

eingeteilt werden (vgl. [Bankhofer et al., 2006]). Intra-Tour-Verfahren zielen auf die Verbesserung der Besuchsreihenfolge innerhalb einer Tour. Im Gegensatz dazu betrachten Inter-Tour-Verfahren mehrere Touren gleichzeitig. Dadurch wird nicht nur die Besuchsreihenfolge innerhalb einer Tour optimiert, sondern es kann auch die Zugehörigkeit der Knoten zu den einzelnen Touren verändert werden. Zu den Intra-Tour-Verfahren zählen beispielsweise die r-opt-Verfahren, die auch als Kantentauschverfahren bezeichnet werden [Grünert und Irnich, 2005]. Dabei werden aus einer gebildeten Tour so lange eine Anzahl von r Kanten entfernt und durch die gleiche Anzahl anderer Kanten ersetzt bis keine weitere Verbesserung möglich ist [Funke, 2003]. Die r-opt-Verfahren können auch als Inter-Tour-Verfahren angewendet werden [Suhl und Mellouli, 2013].

Metaheuristiken wurden entwickelt, um über lokale Optima hinausgehende Verbesserungen zu erreichen [Domschke und Scholl, 2006]. In Analogie zur den Erläuterungen des Teilproblems Produktionsplanung zählen lokale Suchverfahren zu den Metaheuristiken. Darüber hinaus werden Verfahren der künstlichen Intelligenz zur Lösung des Standardproblems der Tourenplanung eingesetzt (vgl. [Pereira und Tavares, 2009]). Dazu zählen bioinspirierte Verfahren wie genetische Algorithmen oder pheromonbasierte Verfahren wie der Ameisenalgorithmus. Durch Metaheuristiken werden auch Lösungsbereiche untersucht, bei denen zunächst eine Verschlechterung der Lösung in gewissen Grenzen zugelassen werden kann (threshold accepting) (vgl. [Kämpf, 2006]). Auf diese Art werden die Beschränkungen aufgehoben, denen lokale Verbesserungsverfahren unterliegen. Dadurch kann auch eine weiter gefasste Umgebung lokaler Optima untersucht werden, was eine weitere Verbesserung der Lösung zur Folge haben kann. Metaheuristiken verwenden als Ausgangspunkt eine durch ein Eröffnungsverfahren generierte zulässige Lösung und untersuchen die Nachbarschaft hinsichtlich verbesserter Lösungen [Kämpf, 2006]. Durch das Zulassen schlechterer Lösungen in den einzelnen Iterationen werden im Vergleich zu den lokalen Verbesserungsverfahren die Chancen erhöht, die globaloptimale Lösung zu erreichen. Simulated Annealing sowie Tabu Search seien hier stellvertretend als Beispiele für Metaheuristiken genannt [Zimmermann, 2008].

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass es kein Lösungsverfahren für das Standardproblem der Tourenplanung gibt, das alle anderen Verfahren in allen Fällen dominiert [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014]. Vielmehr muss in Abhängigkeit von der Problemstellung das geeignete Lösungsverfahren anhand verschiedener Kriterien ausgewählt werden. Die Charakteristika der Problemstellung ergeben sich beispielsweise aus der geografischen Verteilung der Knoten sowie aus der Lage der Knoten zum Depot und der Anzahl der Knoten [Arnold et al., 2008]. Als Kriterien zur Bewertung der Eignung eines Lösungsverfahrens zählen beispielsweise die Lösungsgüte sowie die Lösungsdauer aber auch die Flexibilität bezüglich der Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen [Cordeau et al., 2002]. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt nur die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lösungsverfahren für das Standardproblem der Tourenplanung detailliert vorgestellt.

3.4 Ausgewählte Lösungsverfahren der Transportplanung

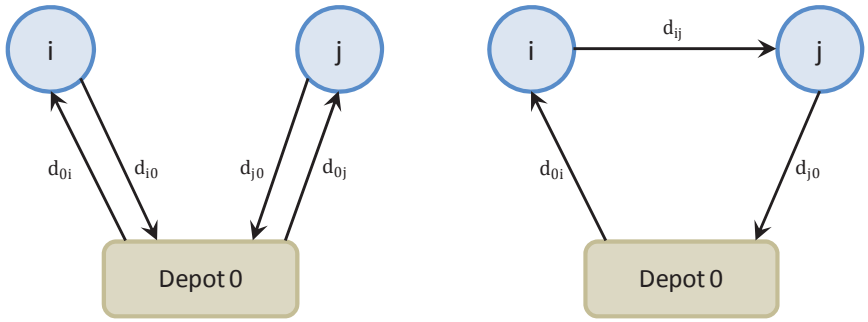
In Analogie zur oben beschriebenen Auswahl von geeigneten Verfahren zur Lösung des Produktionsplanungsproblems sind auch bei der Auswahl von Lösungsverfahren zur Tourenplanung eine hohe Lösungsgüte und eine geringe Lösungsdauer entscheidende Kriterien. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anforderungen dieses Teilproblems umgesetzt und die Zielkriterien bestmöglich erfüllt werden können. Auch die durch die ausgewählten Lösungsverfahren ermittelten Teilergebnisse dienen als Ausgangsbasis für die Integration und werden dabei verändert.

Wie sich in Leistungsvergleichen mit anderen Lösungsverfahren zur Transportplanung gezeigt hat, entsprechen die ausgewählten Lösungsverfahren den Anforderungen nach einer akzeptablen Lösungsdauer und einer hohen Lösungsgüte (vgl. [Reinelt, 1994], [Cordeau et al., 2002], [Johnson und McGeoch, 2002], [Bräysy und Gendreau, 2005], [Grünert und Irnich, 2005a], [Fomundam und Herrmann, 2009] und [Domschke und Scholl, 2010]).

3.4.1 Savings-Verfahren

Das von Clarke und Wright (1964) vorgestellte Savings-Verfahren beruht auf einem Vorschlag von Dantzig und Ramser (1959). Dieses Lösungsverfahren stellt eines der grundlegenden Eröffnungsverfahren für das knotenorientierte Standardproblem der Tourenplanung dar [Ohrt, 2008]. Es gehört zur Klasse der Parallelverfahren, da die Zuordnung einer Tour zu einem Fahrzeug und die Festlegung der Besuchsreihenfolge der Kunden simultan erfolgen [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014]. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, bestehende Pendeltouren an ihren Endknoten zu vereinen und dadurch die zurückzulegende Gesamtwegstrecke zu verkürzen [Grünert und Irnich, 2005]. Es existieren zahlreiche Varianten des Savings-Verfahrens zu denen wiederum verschiedene Erweiterungen entwickelt wurden (vgl. [Ohrt, 2008]). Grundlegend lassen sich die parallele und die sequenzielle Variante unterscheiden. Beim sequenziellen Savings-Verfahren, das nachfolgend detailliert beschrieben wird, wird immer nur die aktuell betrachtete Tour am Ende oder am Anfang und ausgehend von einzelnen Pendeltouren zwischen dem Depot und dem jeweiligen Knoten erweitert [Kämpf, 2006]. Die sequenzielle Variante des ursprünglich entwickelten Verfahrens ist als Ablaufdiagramm in Anhang 1 dargestellt. Im Gegensatz dazu werden bei der parallelen Variante alle Touren gleichzeitig erzeugt [Kämpf, 2006]. Nach dem heutigen Stand der Forschung liefert das parallele Savings-Verfahren tendenziell bessere Ergebnisse als die sequenzielle Variante. Dennoch ist es für die praktische Anwendung sinnvoll, auf das sequenzielle Verfahren zurückzugreifen, da dieses unterschiedliche Kapazitäten von Transportmitteln berücksichtigen kann [Domschke und Scholl, 2010].

Voraussetzung für die Anwendung des Savings-Verfahren ist eine symmetrische Entfernungsmatrix [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014]. Dies bedeutet, dass die Entfernung zwischen zwei Knoten in beiden Richtungen identisch ist (Hinweg ist gleich dem Rückweg). Eine Anfangslösung wird dadurch erzeugt, dass zwischen dem Depot und jedem einzelnen Knoten Pendeltouren eingerichtet werden, die am Depot beginnen und enden [Suhl und Mellouli, 2013]. Die Verbesserung der Ausgangslösung erfolgt durch die Verknüpfung von zwei Touren auf Basis von berechneten Ersparniswerten, den sogenannten „Savings“ [Clarke und Wright, 1964]. Diese Ersparnis berechnet sich aus der Differenz der Wegstrecken von Pendeltouren zu den Knoten i und j einerseits und einer Kombination der Knoten i und j in einer Tour andererseits. Die Ersparnis ist um so größer, je geringer die Distanz zwischen den Knoten i und j ist und je größer ihre Entfernung zum Depot ist [Suhl und Mellouli, 2013]. Die Abbildung 12 stellt die Idee der Berechnung der Savings grafisch dar.



a) Zurückgelegte Strecke bei Direktbelieferung

b) Zurückgelegte Strecke bei Zusammenfassung der Knoten i und j in einer Tour

Abbildung 12 : Grundidee zur Berechnung der Savings-Werte

Die Savings-Werte (s_{ij}) für die Knotenpaare i und j berechnen sich nach folgender Formel:

$$s_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij} \qquad \forall i, j \in N \text{ und } i \neq j \qquad (15)$$

Die eingesparten Strecken, die aus der Verbindung zwischen Kunde i und Kunde j resultieren, ergeben sich durch die Summe der Strecken d_{i0} und d_{0j}. Die zusätzlich zu fahrende Strecke zwischen den beiden Kunden i und j wird mit d_{ij} bezeichnet. Nach der Berechnung aller Savings-Werte werden diese entsprechend ihres Wertes absteigend sortiert, wodurch eine Reihenfolge bei der Betrachtung der Knotenpaare festgelegt wird. Negative Savings-Werte werden nicht weiter berücksichtigt, da sich durch eine Verknüpfung dieser Knotenpaare keine Ersparnis sondern ein zusätzlicher Aufwand ergibt.

In jeder der folgenden Iterationen werden diejenigen Touren miteinander verknüpft, die über den größten Savingswert verfügen [Richter, 2005] und deren Endknoten identisch sind. Ein Endknoten ist definiert als erster oder letzter Knoten einer Tour [Suhl und Mellouli, 2013]. Um eine Verknüpfung durchführen zu können, müssen die zu verknüpfenden Knoten Endknoten unterschiedlicher Touren sein [Grünert und Irnich, 2005a]. Darüber hinaus sind die Restriktionen des untersuchten Problems wie beispielsweise Kapazitätsbeschränkungen der Transportmittel oder die Begrenzung der maximalen Länge einer Tour zu berücksichtigen [Domschke und Scholl, 2006]. Ist eine Erweiterung der aktuell betrachteten Tour auf Grund der Verletzung einer Restriktion nicht möglich, ist die Tourenbildung für diese Tour abgeschlossen und es erfolgt die Eröffnung einer neuen Tour [Richter, 2005]. Nach jeder Iteration werden alle Knoten aus der Liste der Savings-Werte gestrichen, deren Knoten bereits in Touren verplant sind. Das Savings-Verfahren bricht ab, wenn alle positiven Savings-Werte überprüft wurden und ein Tourenplan entstanden ist, der alle Knoten enthält sowie alle Restriktionen berücksichtigt. Der Tourenplan, der sich aus dem Savings-Verfahren ergibt, ist im Allgemeinen suboptimal und kann durch beliebige Verbesserungsverfahren optimiert werden [Suhl und Mellouli, 2013]. Die Abbildung 13 stellt schematisch die Tourenbildung im Laufe des Savings-Verfahrens dar.

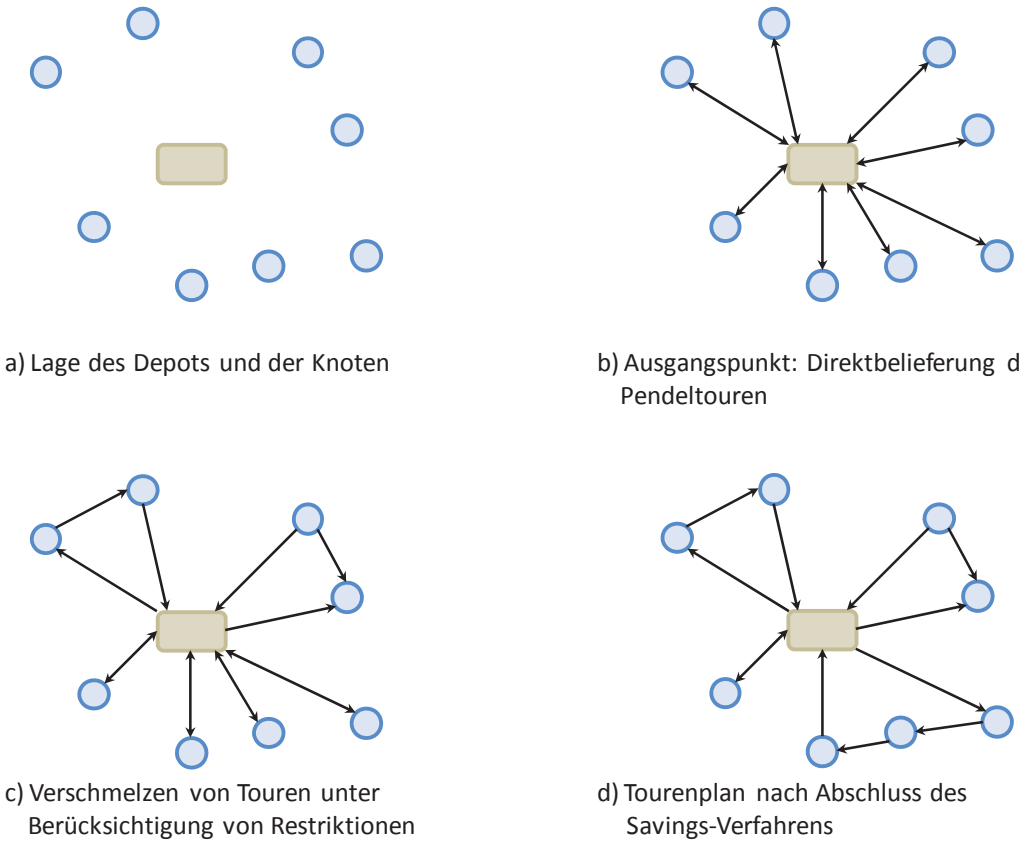


Abbildung 13: Schematischer Ablauf der Tourenbildung im Savings-Verfahren

Da die Verknüpfung von Touren immer mit dem größten Savings-Wert erfolgt und somit in jeder Iteration die größtmögliche Verbesserung angestrebt wird [Domschke und Scholl, 2010], zählt dieses Lösungsverfahren zu den Greedy-Heuristiken (engl. greedy = „gierig“) [Cordeau et al., 2002]. Auf Grund der Einfachheit weist dieses Lösungsverfahren eine geringe Lösungsdauer auf [Cordeau et al., 2002]. Diese wird bei n Knoten mit $\Theta(n^2 \log n)$ angegeben [Johnson und McGeoch, 1997]. Empirische Untersuchungen hinsichtlich der Lösungsgüte haben gezeigt, dass dieses Verfahren gute Lösungen erzeugt, die im Mittel etwa 10 % vom Optimum abweichen [Grünert und Irnich, 2005a]. Die beste Implementierung eines parallelen Savings-Verfahrens mit einem nachgelagerten 3-opt-Verbesserungsverfahren weicht durchschnittlich etwa 6,7 % von der besten bekannten Lösung ab [Cordeau et al., 2002].

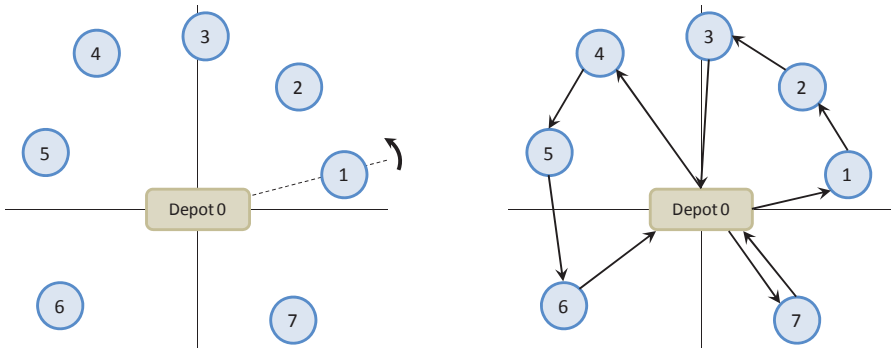
3.4.2 Sweep-Verfahren

Das 1974 von Gillet und Miller (1974) vorgestellte Sweep-Verfahren ist wie das oben vorgestellte Savings-Verfahren ebenfalls eine Eröffnungsheuristik zur Lösung von Tourenplanungsproblemen [Suhl und Mellouli, 2013]. Entsprechend der Abbildung 11 gehört es zur Klasse der Sukzessivverfahren, wobei die weitere Einordnung des Verfahrens in der Literatur strittig ist. Während [Cordeau et al., 2007] und [Rieck, 2008] das Sweep-Verfahren zu den Cluster first - Route second Verfahren zählt, ist es laut [Wenger, 2010] den Route first - Cluster second Verfahren zuzuordnen. Die Vertreter des letzteren Standpunkts betrachten die Sortierung aller Kunden entsprechend ihrer Polarkoordinaten bereits als Routing und die Zuordnung der Kunden zu einzelnen

Touren als Clustering [Arnold et al., 2008]. Wie bereits durch die der Abbildung 11 angedeutet, wird in dieser Arbeit die letztere Auffassung nicht geteilt.

Voraussetzung für die Durchführung des Sweep-Verfahrens ist die Angabe der Standpunkte der Kunden als kartesische Koordinaten oder Polarkoordinaten. Das Depot selbst dient dabei als Ursprung des Koordinatensystems. Die Entfernungen zwischen den Kunden bzw. zwischen dem Depot und den einzelnen Kunden lassen sich aus den Koordinaten berechnen oder werden als tatsächliche Entfernung auf der Straße angegeben. [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014]

Zu Beginn des Verfahrens erfolgt eine Sortierung der Kunden nach aufsteigenden Polarwinkeln, was einer Sortierung gegen den Uhrzeigersinn entspricht. Nach der Sortierung werden die Kunden in dieser Reihenfolge für die nachfolgenden Schritte des Verfahrens von 1 bis n nummeriert. Beginnend mit dem ersten Kunden wird die erste Tour sukzessive um die der Reihenfolge entsprechenden Kunden erweitert, bis durch das Hinzufügen eines weiteren Kunden Kapazitätsrestriktionen oder Entfernungsbeschränkungen verletzt werden. Ist das Hinzufügen eines weiteren Kunden zu einer Tour nicht möglich, wird die jeweilige Tour geschlossen und eine neue Tour initiiert. Die Tourenbildung ist abgeschlossen, wenn alle Kunden einer Tour zugeordnet sind und damit ein vollständiger Tourenplan vorliegt. Aufbauend auf diesem Tourenplan kann jede darin enthaltene Tour gegebenenfalls durch die Anwendung von Verbesserungsverfahren optimiert werden [Domschke und Scholl, 2010]. Auf Grund der Vorgehensweise ähneln die ermittelten Tourenpläne einer Blütenstruktur, wenn sich die zu beliefernden Kunden zentral um ein Depot herum anordnen. Aus diesem Grund wird das Sweep-Verfahren auch als Petal- Heuristiken (dt.: Blütenblatt) bezeichnet [Domschke und Scholl, 2010]. Die Abbildung 14 zeigt schematisch den Ablauf des Sweep-Verfahrens.



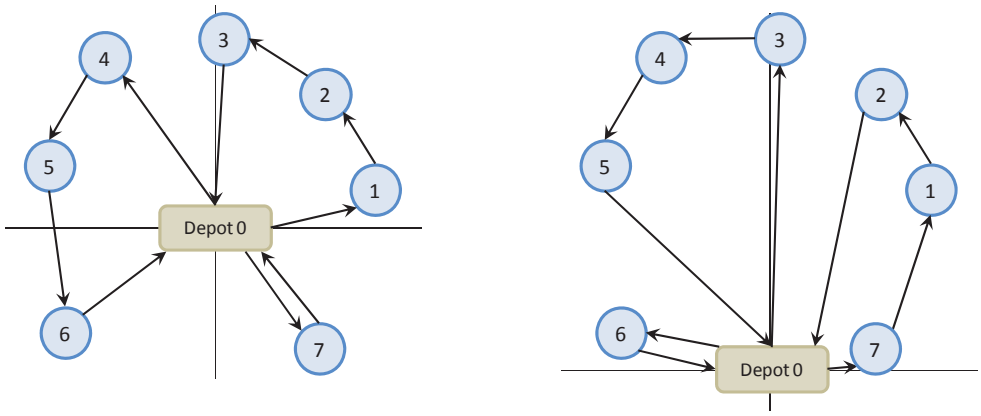
a) Lage des Depots und der Knoten

b) Vollständiger Tourenplan nach Anwendung des Sweep-Verfahrens

Abbildung 14: Schematischer Ablauf der Tourenbildung im Sweep-Verfahren

Zu dem ermittelten ersten Tourenplan können bei einer umfassenden Betrachtung weitere alternative Tourenpläne erzeugt werden. Dies erfolgt durch die schrittweise Veränderung des Startpunktes der jeweils ersten Tour eines Tourenplans. Dies bedeutet, dass die erste Tour des zweiten Tourenplanes mit Kunde zwei, die erste Tour des dritten Tourenplanes mit Kunde drei usw. beginnt. Die Bildung der weiteren Touren innerhalb eines Tourenplans erfolgt dann wie bereits beschrieben. Auf diese Weise werden insgesamt n verschiedene Tourenpläne ermittelt, wobei sich die Startlösung des Tourenplanungsproblems aus dem besten Tourenplan aller ermittelten Alternativen ergibt. [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014]

Die Lösungsgüte des Sweep-Verfahrens ist abhängig von der relativen geografischen Anordnung der Kunden und des Depots. Bei einer zentralen Lage des Depots relativ zur geografischen Verteilung der Kundenstandorte werden bessere Ergebnisse erzielt als bei einer Randlage des Depots. Aus diesem Grund eignet sich das Sweep-Verfahren nicht allgemein zur Lösung jedes Tourenplanungsproblems [Arnold et al., 2008]. Die Abbildung 15 verdeutlicht diesen Zusammenhang grafisch, wonach sehr viel längere Touren entstehen, wenn sich das Depot in einer Randlage befindet. Das im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete Szenario weist ein Depot in zentraler Lage auf.



a) Tourenplan bei Depot mit Zentrallage

b) Tourenplan bei Depot mit Randlage

Abbildung 15: Tourenpläne mit unterschiedlicher Lage des Depots

3.4.3 2-opt-Verfahren

Die Verbesserung einer vorhandenen Tour und damit die Verkürzung der Länge dieser Tour kann nach Grünert und Irnich (2005a) nur dadurch erreicht werden, dass bestimmte Kanten entfernt und durch andere bestimmte Kanten ersetzt werden. Auf Grund dieser Tatsache werden die Intra-Tour-Verfahren auch als Kantenaustauschverfahren bezeichnet. In der Regel lässt die Bezeichnung des Verfahrens Rückschlüsse auf die Anzahl der auszutauschenden Kanten r zu. Deshalb werden diese Verfahren im Allgemeinen auch r-opt-Verfahren genannt. Dabei ist zu beachten, dass sich bei den r-opt-Verfahren für symmetrische und asymmetrische TSP Unterschiede ergeben [Wenger, 2010]. Im asymmetrischen Fall könnte durch die Vertauschungen eine unzulässige Kantenorientierung entstehen. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit allerdings von symmetrischen Graphen ausgegangen wird, bleibt der asymmetrische Fall im Folgenden unberücksichtigt.

Das 2-opt-Verfahren wurde von Croes (1958) entwickelt und von Lin (1965) auf größere r übertragen. Es basiert nach Johnson und McGeoch (1997) auf einer Idee von Flood (1956). Es ist das einfachste und deshalb das am häufigsten verwendete der r-opt-Verfahren [Grünert und Irnich, 2005a]. Die Abbildung 16 bildet das Prinzip des 2-opt-Verfahrens ab, bei dem zwei vorhandene Kanten gegen zwei andere Kanten ausgetauscht werden und dadurch jeweils zwei neue Knoten miteinander verbinden.

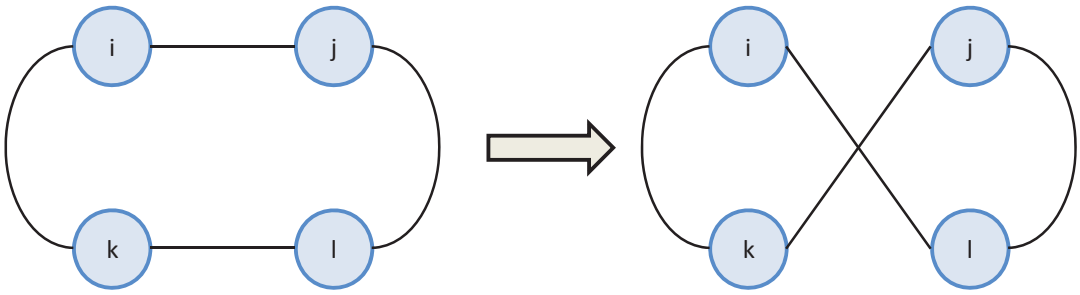


Abbildung 16: Grundidee des 2-opt-Verfahrens

Charakteristisch für das 2-opt-Verfahren ist die Tatsache, dass es nach dem Entfernen von zwei Kanten aus einer Tour nur eine Möglichkeit gibt, durch das Hinzufügen von zwei anderen Kanten eine neue Tour zu erzeugen. Die andere Möglichkeit würde keine einzelne Rundreise erzeugen, sondern zwei voneinander getrennte Touren darstellen. Dabei ist es zwingend notwendig, dass sich eine neu eingefügte Kante von der entfernten Kante unterscheidet. Andernfalls kann keine neue Tour erzeugt werden. [Grünert und Irnich, 2005a]

Im Laufe des Verfahrens werden alle möglichen Kantenkombinationen hinsichtlich einer Verkürzung der Tour untersucht. Die Menge der sich durch den Kantenaustausch ergebenden neuen Touren wird als 2-opt-Nachbarschaft bezeichnet [Funke, 2003]. Alle neu gebildeten Touren der 2-opt-Nachbarschaft werden hinsichtlich ihrer Tourenlänge beurteilt und mit der durch das Eröffnungsverfahren erzeugten Lösung verglichen. Im Rahmen dieser Arbeit und in Anlehnung an die Fachliteratur wird eine Tour als 2-optimal bezeichnet, wenn diese nach Abschluss des Verfahrens im Vergleich mit anderen erzeugten Lösungen der 2-opt-Nachbarschaft die geringste Tourlänge aufweist [Suhl und Mellouli, 2013].

Nach Anwendung des 2-opt-Verfahrens können höhere Verfahren bis zum 5-opt oder 6-opt-Verfahren angewendet werden. Dies wird aber auf Grund des hohen Rechenaufwandes [Applegate et al., 2006] und nur noch geringer Steigerungen der Lösungsgüte [Mattfeld und Vahrenkamp, 2014] abgelehnt. Bereits die Anwendung des 2-opt-Verfahrens auf Probleme mit mehreren hundert Kanten zieht einen hohen Rechenaufwand nach sich. Dieser wird allgemein mit $\Theta(2^{n/2})$ angegeben [Johnson und McGeoch, 1997]. Zur Reduzierung der Lösungsdauer wird daher vorgeschlagen, nicht jede einzelne, sondern nur ausgewählte Kanten miteinander zu vertauschen [Kämpf, 2006]. Die in dieser Arbeit untersuchten Szenarien weisen eine überschaubare Knotenanzahl auf. Aus diesem Grund und wegen der Einfachheit und der daraus resultierenden geringen Lösungsdauer wird das 2-opt-Verfahren als ein Verbesserungsverfahren zur Lösung des TSP zur Anwendung kommen.

3.4.4 3-opt-Verfahren

Neben dem 2-opt-Verfahren kommt dem 3-opt-Verfahren ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Verbesserung einer Ausgangslösung zu. Das 3-opt-Verfahren kann im Anschluss an das 2-opt-Verfahren oder direkt auf die mit Hilfe eines Eröffnungsverfahrens erzeugte Ausgangslösung angewendet werden. Im Unterschied zum 2-opt-Verfahren werden beim 3-opt-Verfahren drei Kanten einer Tour entfernt und durch das Einfügen von drei anderen Kanten die Knoten wieder miteinander in einer Tour verbunden. [Grünert und Irnich, 2005a]

Für das Entfernen und Hinzufügen von Kanten gelten die gleichen Regeln wie beim 2-opt-Verfahren. Aus diesem Grund soll hier ein Verweis ausreichen und auf eine Wiederholung verzichtet werden.

Die nachfolgende Abbildung 17 verdeutlicht das Prinzip des Kantentauschs beim 3-opt-Verfahren, wobei die zu entfernenden Kanten mit x und die eingefügten Kanten mit y gekennzeichnet sind.

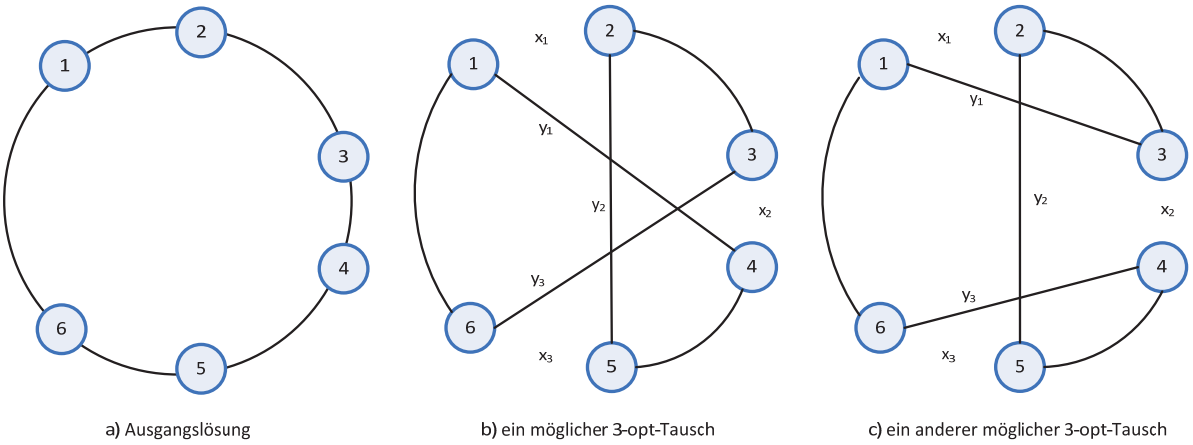


Abbildung 17: Grundidee des 3-opt-Verfahrens

Das 3-opt-Verfahren wird im weiteren Verlauf der Arbeit im Anschluss an das 2-opt-Verfahren angewendet. Dadurch soll eine weitere Verbesserung der Lösungsgüte erreicht werden.

4 Das integrierte Planungsproblem

4.1 Grundlagen des IPODS

Das Problem der integrierten Produktions- und Transportplanung ist in vielen Industriezweigen praxisrelevant [Geismar et al., 2008]. Trotz dieser hohen Praxisrelevanz ist die integrierte Planung im Allgemeinen und die integrierte Planung dieser beiden hier betrachteten Teilprobleme im Speziellen ein vergleichsweise junges Forschungsfeld [Chen, 2010]. Zum besseren Verständnis dieser Problematik und ihrer unterschiedlichen Aspekte werden in diesem Abschnitt die Grundlagen gelegt. Ausgehend von einer Definition des Problems der integrierten Planung von Produktion und Transport wird diese mit Hilfe von Begriffsdefinition als Konzept in das Supply Chain Management eingeordnet. Danach wird die integrierte Planung gegenüber ähnlichen Konzepten des Supply Chain Managements abgegrenzt. Anschließend wird das Zielsystem sowie die bei der integrierten Betrachtung zweier voneinander abhängiger Teilprobleme entstehenden Zielkonflikte und das mögliche Verbesserungspotenzial beschrieben sowie ein Schema zur Klassifikation integrierter Planungsmodelle entwickelt. Abschließend wird aufbauend auf den bisherigen Betrachtungen das Standardproblem der integrierten Planung vorgestellt sowie ein Überblick über Lösungsverfahren gegeben bevor einzelne, ausgewählte Lösungsverfahren detailliert beschrieben werden.

4.1.1 Definition des Problems der integrierten Planung

Zur Definition des Problems der integrierten Planung wird auf die oben gegebene Definition des Begriffs Planung zurückgegriffen. Danach wird bei der Planung eine Zuordnung von Aufgaben zu vorhandenen Ressourcen innerhalb eines definierten Zeitraums vorgenommen mit dem Ziel der Optimierung mehrerer Zielkriterien (vgl. [Pinedo, 2012] und [Stadtler, 2009]). Davon abgeleitet besteht das Ziel einer integrierten Planung im Allgemeinen in der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Lieferkette durch die verbesserte Nutzung der vorhandenen Ressourcen bei der Auftragszuordnung im Zuge einer unternehmensübergreifenden Betrachtung. Die Wettbewerbsfähigkeit wird dabei über mehrere Zielkriterien ausgedrückt, die es zu optimieren gilt.

Bei der integrierten Planung werden somit mindestens zwei Planungsprobleme (Teilprobleme) aus unterschiedlichen Funktionsbereichen in einem einzigen Planungsproblem zusammengeführt und gleichzeitig betrachtet [Park, 2005]. Durch diese Integration wird ein Planungsproblem geschaffen, bei dem die Anforderungen der betroffenen Funktionsbereiche sowie alle Restriktionen gemeinsam berücksichtigt werden (vgl. [Park, 2005] und [Chen, 2010]). Als Funktionsbereiche gelten Beschaffung und Produktion sowie Lagerung und Distribution mit ihren von der Managementebene abhängigen Detaillierungsstufen. Je nach Aufgabenstellung umfasst der Betrachtungsbereich unterschiedliche Funktionsbereiche, wobei in der Regel benachbarte Funktionsbereiche von der Integration erfasst werden. Das Ziel dieser integrierten Betrachtung ist die Optimierung des gesamten Betrachtungsbereichs, wobei die Ziele der einzelnen Funktionsbereiche in den Hintergrund rücken müssen [Chen und Hall, 2007]. Auf Grund der hohen Komplexität des integrierten Planungsproblems wird der Betrachtungsbereich in der Literatur üblicherweise auf zwei Teilprobleme einer Managementebene beschränkt.

Für die integrierte Planung von Produktion und Transport ergeben sich auf den verschiedenen Managementebenen unterschiedliche Fragestellungen. Auf strategischer und taktischer Ebene stehen hauptsächlich das Design eines Netzwerks aus Produktions- und Distributionsstandorten im

Fokus der Betrachtungen [Lourenco, 2005]. Weitere relevante Fragestellungen in diesem Bereich betreffen beispielsweise die Auswahl und die Dimensionierung der Distributionsstandorte sowie die Gestaltung der Relationen zwischen diesen Standorten und den Transportzielen. Für einen Überblick über die existierenden Planungsansätze auf diesen beiden Managementebenen sei hier auf die Literatur verwiesen (vgl. [Vidal und Goetschalckx, 1997], [Sarmiento und Nagi, 1999] und [Chen, 2004]).

Während auf strategischer und taktischer Planungsebene bereits zahlreiche Ergebnisse in Form von Modellen und Planungsansätzen vorliegen, ist die integrierte Planung auf operativer Ebene erst in den letzten Jahren ins Blickfeld der Forschung gerückt [Chen, 2010]. Das Problem der integrierten Planung auf der operativen Planungsebene besteht in der gegenseitigen Abstimmung und Planung von Aktivitäten und der Nutzung von Ressourcen zur Bearbeitung von Aufträgen [Bleicher, 2003]. Auf dieser operativen Ebene sind über alle Funktionsbereiche hinweg Entscheidungen zu treffen, deren Auswirkungen kurzfristig sind und unmittelbar das operative Tagesgeschäft der betroffenen Unternehmen bestimmen.

Wie bereits erläutert, werden in dieser Arbeit die Funktionsbereiche Produktion und Distribution mit ihren Teilproblemen Produktionsplanung und Transportplanung in einem integrierten Planungsproblem auf operativer Managementebene zusammengeführt. In der Literatur wird das Problem der integrierten Planung der Produktion und des überbetrieblichen Transport auf operativer Ebene wird in der Literatur durch die Begriffe *integrated production and outbound distribution scheduling problem* (IPODS) bzw. *production distribution problem* (PDP), *production, inventory, distribution routing problem* (PIDRP) sowie *production and transportation scheduling problem* (PTSP) repräsentiert. Im Folgenden wird für dieses Problem die Abkürzung IPODS verwendet.

4.1.2 Begriffsbestimmung und Einordnung der integrierten Planung in das SCM

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Definitionen für den Begriff Supply Chain Management, die je nach Blickwinkel der jeweiligen Autoren deutlich auseinander gehen (vgl. [Croom et al., 2000], [Mentzer et al., 2001], [Otto und Kotzab, 2001], [Sachan und Datta, 2005], [Burgess et al., 2006] und [Naslund und Williamson, 2010]). Über alle diese verschiedenen Blickwinkel hinweg herrscht dennoch Einigkeit darüber, dass es im Kern um eine unternehmensübergreifende Betrachtung und Koordination der in einer Lieferkette stattfindenden Prozesse zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Supply Chain geht. Um dies zu erreichen, wurden verschiedene Verfahren, Methoden und Konzepte entwickelt, die als Instrumente zur Umsetzung des SCM dienen und jeweils verschiedene Aspekte der Lieferkette unterstützen. Da eine detaillierte Vorstellung aller im Rahmen des SCM entwickelten Methoden und Konzepte nicht Inhalt dieser Arbeit ist, sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (vgl. [Arnold et al., 2008] und [Werner, 2013]).

Für die Einordnung des hier betrachteten Problems der integrierten Planung in den Kontext des Supply Chain Managements ist zunächst die Definition der Begriffe Koordination, Kooperation, Kollaboration und Integration notwendig. Diese Begriffe tauchen in Zusammenhang mit dem SCM und dem hier betrachteten integrierten Planungsproblem auf und werden trotz unterschiedlicher inhaltlicher Bedeutung in der Literatur zum Teil synonym verwendet ohne auf die inhaltlichen Unterschiede einzugehen [Moharana et al., 2012]. Die folgenden Begriffsdefinitionen und die darüber hinausgehenden Erläuterungen dienen als Ausgangsbasis für die Einordnung des Themas in das Supply Chain Management und darüber hinaus als einheitliche Grundlage für die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit.

Der Begriff *Koordination* bezeichnet die Ausrichtung voneinander abhängiger Entscheidungen oder Aktivitäten mehrerer arbeitsteilig organisierter Akteure auf ein gemeinsames Ziel [Sucky, 2004]. Übertragen auf die Prozesse innerhalb einer Lieferkette enthält die Definition des Begriffs Koordination im Wesentlichen den Kern der oben angegebenen Definition des Supply Chain Managements. Das Ziel der Koordination ist es, die individuellen Pläne der einzelnen Akteure so aufeinander abzustimmen, dass die Leistungsfähigkeit der gesamten Lieferkette verbessert wird [Dawande et al., 2006]. Damit umfasst dieser Begriff ebenfalls alle Instrumente, die im Rahmen des SCM entwickelt wurden und die dadurch zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen. Dabei kann eine Koordination von Entscheidungen oder Aktivitäten im Rahmen des SCM grundsätzlich entweder zentral oder dezentral durchgeführt werden (vgl. [Schneeweiss und Zimmer, 2004] und [Breiter et al., 2009]). Eine zentrale Koordination weist im Gegensatz zur dezentralen Koordination hierarchische Strukturen mit einer übergeordneten Instanz oder einem dominanten Unternehmen auf, das die Führerschaft übernimmt [Sucky, 2004]. Ziele und Entscheidungen des übergeordneten Systems bestimmen den Planungsrahmen der untergeordneten Subsysteme [Zimmer, 2001]. In dezentralen Strukturen sind die Unternehmen weitgehend gleichberechtigt, können aber dennoch über eine zentrale und unabhängige Instanz zur Koordination verfügen [Sucky, 2004].

Die Begriffe *Kooperation* und *Kollaboration* bezeichnen unterschiedliche Arten einer Beziehung zwischen Unternehmen, die sich durch die Intensität der Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern unterscheiden. Der Begriff Kooperation (lat. cooperatio: Mitwirkung) beschreibt den Zustand einer freiwilligen Zusammenarbeit von verschiedenen Partnern zum Erreichen gemeinsamer Ziele [Smith et al., 1995]. Dabei ist die Zusammenarbeit eher als eine lose und oftmals zeitlich begrenzte Form der Kooperation zu verstehen [Wildemann, 1997]. Bezogen auf eine Lieferkette beschreibt die Kooperation die Zusammenarbeit von Unternehmen, die innerhalb einer Supply Chain aufeinander folgende Positionen der Wertschöpfungskette einnehmen [Magnus, 2007]. Diese Begrenzung auf eine vertikale Kooperation muss bei der Betrachtung einer Lieferkette als Unternehmensnetzwerk auch auf die horizontale Ebene erweitert werden. In der Literatur finden sich weitere Ansätze zur Definition, die sich diesem Begriff auf unterschiedlichen Blickwinkeln annähern (vgl. [Magnus, 2007]). Im Gegensatz zur Kollaboration findet bei einer Kooperation keine Zusammenarbeit auf einer planerischen oder operativen Ebene statt [Hord, 1981].

Die Kollaboration (zusammengesetzt: lat. co: mit und lat. laborare: arbeiten) bezeichnet eine intensive Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern und stellt somit eine besonders ausgeprägte Form der Kooperation dar. Diese bezieht sich zumeist auf die taktische und operative Ebene [Bogaschewski, 2002] und beschreibt die enge Zusammenarbeit unterschiedlicher Unternehmen (vgl. [Barratt, 2004] und [Daugherty, 2011]). Eine Übersicht von ausgewählten Definitionen zur Kollaboration innerhalb einer Lieferkette (Supply Chain Collaboration (SCC)) sowie entsprechende Anwendungsfelder und weitere Merkmale einer Kollaboration finden sich bei unter anderem bei [Völker und Neu, 2008]. Die Basis für eine erfolgreiche Kollaboration ist ein hohes Maß an gegenseitigem Vertrauen [Mehrjerdi, 2009], das durch die enge Zusammenarbeit und den daraus resultierenden Aufbau von persönlichen Beziehungen zwischen den Mitarbeitern der beteiligten Unternehmen entsteht [Friedrich und List, 2009]. Ein wesentliches Kennzeichen einer Kollaboration ist der intensive Austausch von Informationen zwischen den beteiligten Unternehmen hinsichtlich Planungs- und Managementaktivitäten sowie bezüglich operativer Kennzahlen (vgl. [Anthony, 2000] und [Min et al., 2005]). Weiterhin gelten eine offene Kommunikation sowie ein ausgeglichenes Machtverhältnis zwischen den Partnern als Merkmale der Kollaboration [Krapfel et al., 1991]. Dabei geben die beteiligten Unternehmen einen Teil ihrer wirtschaftlichen Unabhängigkeit auf und treten

gegenüber Dritten als ein Marktteilnehmer auf [Völker und Neu, 2008]. Dennoch gehen Unternehmen eine Kooperation oder eine Kollaboration in der Regel nur dann ein, wenn sie sich aus dieser Beziehung einen Vorteil versprechen [Cheng, 2011]. Zur praktischen Ausgestaltung einer Kollaboration wurden verschiedene Ansätze entwickelt, für die an dieser Stelle ein Verweis auf die Literatur ausreichen soll (vgl. [Albrecht, 2010]).

Die beiden Begriffe Kooperation und Kollaboration lassen sich nur schwer voneinander trennen, da es keine klaren Grenzen gibt und der Übergang zwischen beiden Begriffen in der praktischen Anwendung fließend ist. Die Beziehung zwischen zwei Unternehmen kann auf eine bestimmte Intensität beschränkt sein oder sich aber mit zunehmender Zeit der Zusammenarbeit auch evolutionär entwickeln. Die Abbildung 18 stellt diese evolutionäre Entwicklung und deren charakteristische Merkmale nach Camarinha-Matos und Afsarmanesh (2008) dar.

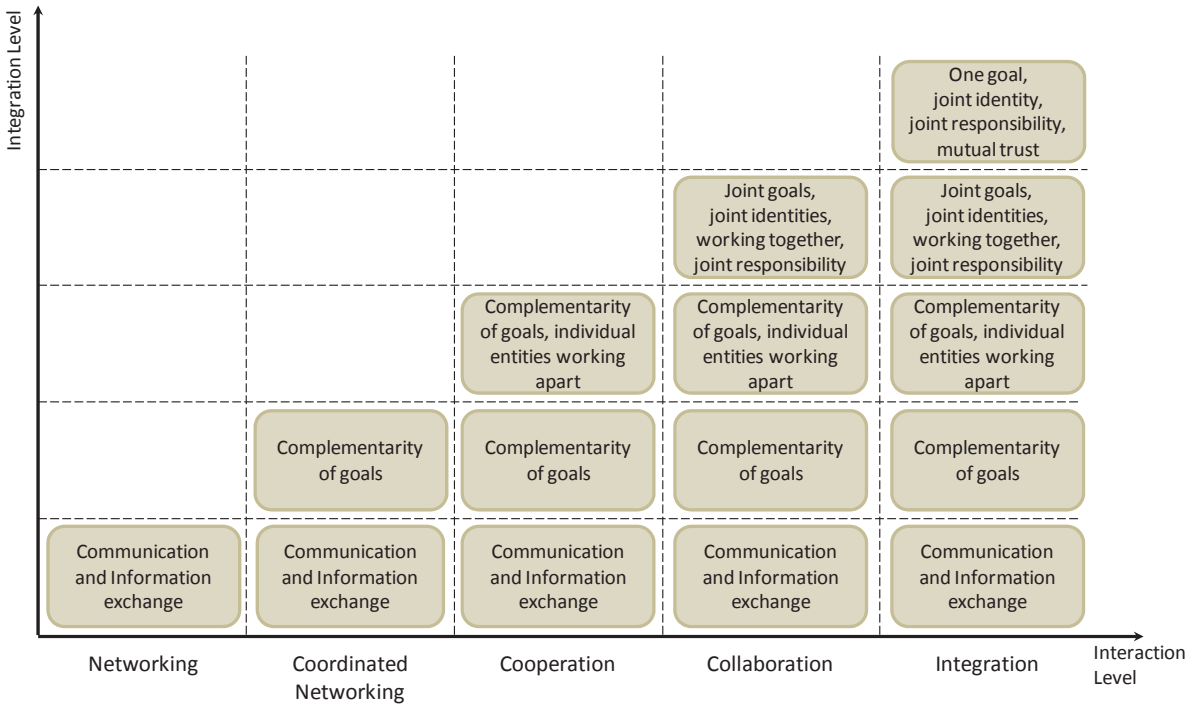


Abbildung 18: Evolution von Unternehmensbeziehungen und deren Merkmale

Der Begriff *Integration* beschreibt die Eingliederung unterschiedlicher Aspekte in ein größeres Ganzes [Duden, 2010]. Die Ursprünge dieses Begriffs liegen im Kontext des Managements in der Organisationstheorie, wobei im Laufe der Zeit eine Ausweitung auf andere Bereiche wie beispielsweise das Supply Chain Management stattgefunden hat [Turkulainen und Ketokivi, 2012]. Das Problem der Integration auf der operativen Planungsebene besteht in der gegenseitigen Abstimmung und Planung von Aktivitäten und der Nutzung von Ressourcen zur Bearbeitung von Aufträgen [Bleicher, 2003]. Dazu sollen durch die Integration existierende Schnittstellen zwischen den Unternehmen verringert oder vermieden werden, was zu einer Reduzierung des Koordinationsaufwands führt (vgl. [Clark et al., 2001] und [Bauer, 2003]). Für diese integrierte Betrachtung von Planungsproblemen ist eine vertiefte Kollaboration notwendig, wofür verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Dazu zählen neben Vertrauen und der Existenz entsprechender organisatorischer Strukturen auch die notwendige technische Infrastruktur und eine sehr hohe

Transparenz hinsichtlich der betroffenen Prozesse, deren Kosten und den verfügbaren Ressourcen [Strassner, 2005]. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass der Integrationsgrad mit der Intensität, mit der die Kollaboration stattfindet, korrespondiert (vgl. [Frohlich und Westbrook, 2001] , [O'Leary-Kelly und Flores, 2002] und [Aryee et al., 2008]). Auf Grund dieser engen Beziehung zwischen den Begriffen Integration und Kollaboration wird die Kollaboration vereinzelt auch als eine Komponente der Integration angesehen [Stadtler, 2008]. Diese Auffassung wird in dieser Arbeit allerdings nicht vollständig geteilt. Die Integration, so wie sie in dieser Arbeit verstanden wird, weist eine sehr hohe Intensität auf und geht weit über eine Abstimmung von Prozessen und Planungsergebnissen hinaus. Das Ziel der hier betrachteten Integration ist ausschließlich die Optimierung des gesamten Betrachtungsbereichs der Lieferkette. Unter diesem Blickwinkel entspricht die hier betrachtete Form der Integration einer sehr intensiven Form der unternehmensübergreifenden Kollaboration, da unternehmenseigene Interessen vollständig dem übergeordneten Ziel untergeordnet werden.

Die eingeführten Begriffe der Kooperation, Kollaboration und Integration können in Anlehnung an die Abbildung 18 als unterschiedliche Arten einer Beziehung zwischen Unternehmen aufgefasst werden, die durch eine unterschiedliche Intensität der Beziehung gekennzeichnet sind. In der Abbildung 19 ist diesen Beziehungsarten eine Auswahl der im Laufe der Zeit entwickelten Instrumente des Supply Chain Managements zugeordnet. Dadurch erfolgt eine Einordnung des Instruments der integrierten Planung in das Supply Chain Management. In der Literatur herrscht Uneinigkeit über die Definition einzelner Instrumente und deren Zuordnung zu den Beziehungsarten und Entwicklungsstufen. Auf Grund dessen stellt diese Abbildung lediglich eine mögliche Anordnung wieder. Weiterhin ist aus dieser Abbildung ersichtlich, dass die Entwicklung der Instrumente des Supply Chain Managements eng an die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) gekoppelt ist [Zimmer, 2001]. Durch diese Entwicklung werden Veränderungen im Supply Chain Management ausgelöst [Cross, 2000], was wiederum zur Veränderung bestehender und zur Entstehung neuer Prozesse führt [Strassner, 2005]. Dabei hat sich die Entwicklung des SCM in vier Stufen vollzogen (vgl. [Baumgarten, 2004] und [Werner, 2013]), die sich ebenfalls in der Abbildung 19 wiederfinden und die im folgenden kurz erläutert werden, um die Einordnung der Integration und der integrierten Planung in diese Entwicklung zu verdeutlichen.

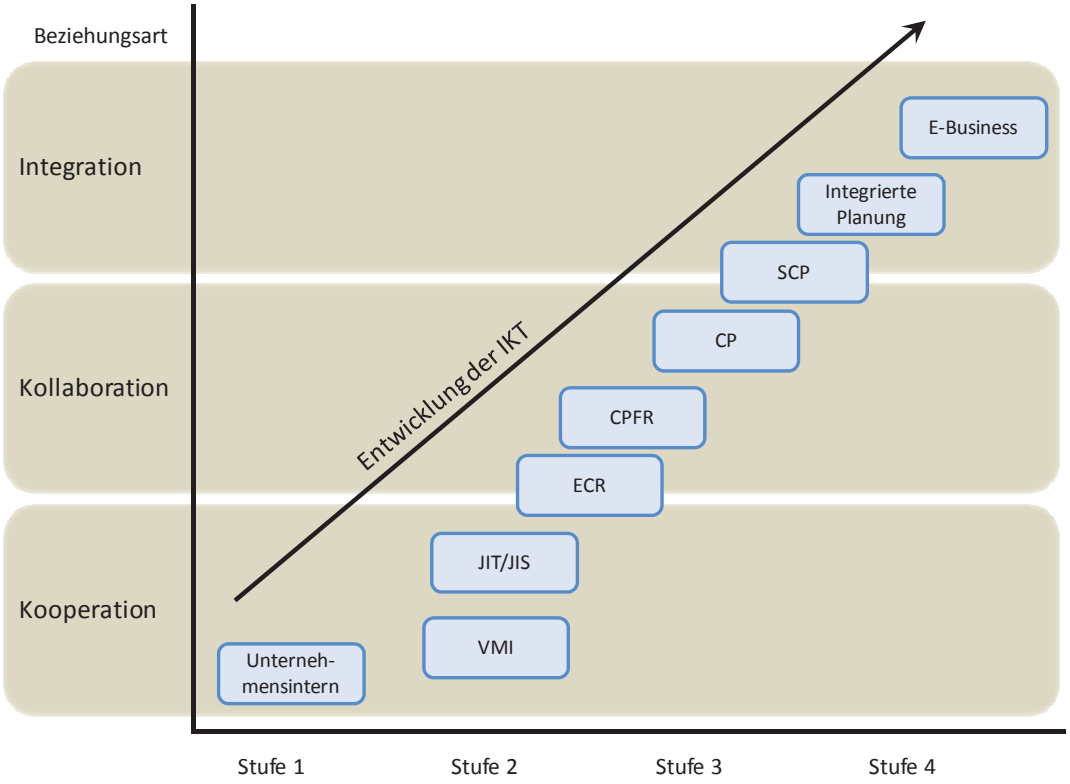


Abbildung 19: Einordnung des Instruments der integrierten Planung in das SCM

In der ersten Stufe fanden Optimierungen von Geschäfts- und Planungsprozessen nur innerhalb eines Unternehmens zunächst statt [Schuh et al., 2003]. Das Ziel dieser Optimierungen ist die verbesserte Verknüpfung unternehmensinterner Funktionen [Werner, 2013]. Mit der Entwicklung der Informationstechnologie in der zweiten Stufe wurde eine verbesserte Kommunikation zwischen Unternehmen und ihren Kunden und Lieferanten sowie zu ihren Dienstleistern ermöglicht, wodurch sich neue Formen der Zusammenarbeit ergeben [Bauer, 2003]. Als Folge dieser Entwicklung konnten weltweite Fertigungs- und Distributionsstrukturen aufgebaut [Braun, 2003] und mehr Verantwortung auf Dienstleister übertragen werden. Auf der dritten Stufe wurden durch die Entstehung und Nutzung internetbasierter Technologien Möglichkeiten für einen effizienten Informationsaustausch in Echtzeit geschaffen. Dadurch wurden kollaborative Formen der Zusammenarbeit in global verteilten Arbeitsumgebungen ermöglicht (vgl. [Wu et al., 2000] und [Ziegler, 2003]). Diese kommen insbesondere Prozessen (z. B. Planungsprozesse) zugute, die in hohem Maße von gut funktionierenden Informationsflüssen abhängig sind [Kuhn und Hellingrath, 2003]. Heutzutage ist eine echtzeitfähige Kommunikation und der internetbasierte Austausch großer Datenmengen in angemessener Zeit die Basis für die Bewältigung der operativen Aufgaben. [Lancioni et al., 2000] untersuchten die Bedeutung des Internet für die Aufgabenerfüllung im Rahmen des Supply Chain Management und identifizierten die durch die Nutzung des Internet mögliche Verfügbarkeit von Informationen als erfolgskritischen Faktor. Erst durch diese Leistungsfähigkeit der IKT werden Unternehmen in die Lage versetzt, effizient über Unternehmensgrenzen hinweg eng miteinander zusammenzuarbeiten. Die technologische Basis stellt daher einen wesentlichen Faktor, durch den es erst möglich geworden ist, Planungsprobleme in Lieferketten über Unternehmensgrenzen hinweg und integriert zu betrachten. Die integrierte Planung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird, ist dieser dritten Stufe zuzuordnen. Auf der vierten Stufe finden alle Informationsflüsse und

Planungsprozesse auf elektronischem Weg statt und sind folglich jederzeit und überall verfügbar [Baumgarten, 2004]. Durch dieses E-Business werden Planungs- und Geschäftsprozesse automatisiert und interne sowie externe Lieferketten synchronisiert [Werner, 2013].

4.1.3 Abgrenzung zu ähnlichen SCM-Instrumenten

Nach der Abgrenzung der integrierten Planung bzw. der Integration im Allgemeinen hinsichtlich der Begrifflichkeiten erfolgt in diesem Abschnitt eine Abgrenzung zu den SCM-Instrumenten, die eine große Ähnlichkeit zur integrierten Planung aufweisen und deshalb auch in der Literatur häufig in diesem Zusammenhang verwendet werden. Dazu zählen die Supply Chain Synchronisation und das Collaborative Planning sowie das Supply Chain Scheduling und das Supply Chain Planning.

Unter der Supply Chain Synchronisation wird im Allgemeinen die Integration von Lieferanten, Dienstleistern und Kunden verstanden [Aryee et al., 2008]. Dies geschieht zumeist aus der Sicht des OEM (Original Equipment Manufacturer) oder des Kunden. Dabei werden die Prozesse bei Lieferanten und Dienstleistern auf die Prozesse des OEM oder auf die Anforderungen des Kunden abgestimmt. Es existiert demnach ein dominanter Partner in der Lieferkette, der die Führerschaft übernimmt und auf operativer Managementebene den Takt für die Synchronisation determiniert. Diese Form der Synchronisation entspricht im Wesentlichen der Definition des Begriffs Extended Enterprise [vgl. Childe, 1998]. Dadurch ergibt sich eine hierarchische Planung, bei der die dominierende Entscheidungsinstanz eine Planung durchführt und dadurch den Rahmen für die untergeordneten Entscheidungsinstanzen vorgibt (vgl. [Stadtler, 2008] und [Dudek, 2009]).

Das Collaborative Planning (CP) verbindet einzelne Teilprobleme, die auch als Planungsdomänen bezeichnet werden, durch einen gemeinsamen und auf Verhandlungen basierenden Abstimmungsprozess [Kilger et al., 2008]. Dazu werden die individuellen Planungsergebnisse den am Abstimmungsprozess beteiligten Partnern innerhalb der Lieferkette vorgelegt und durch Abwandlungen Gegenvorschläge erzeugt [Dudek und Stadtler, 2005]. Ziel dieser Abwandlungen ist es, das eigene Planungsergebnis mit wenigen Schritten so weit wie möglich zu verbessern, ohne dabei die Grenzen der Gültigkeit der Vorschläge der SC-Partner zu verletzen [Dudek und Stadtler, 2005]. Das durch diesen Abstimmungsprozess erreichte Ergebnis wird als integrierte Planung betrachtet [Dudek und Stadtler, 2005], da durch alle am Abstimmungsprozess beteiligten Partner Änderungen an den eigenen Planungsergebnissen vorgenommen werden, um die Anforderungen andere Partner zu berücksichtigen. Im Vergleich zur traditionellen Art der sequenziellen Planung verspricht das CP mit Hinblick auf die Leistung des gesamten Betrachtungsbereichs verbesserte Planungsergebnisse. Allerdings muss bei dem verhandlungsbasierten Ansatz des CP wiederum die Verhandlungsmacht der Planungsdomänen beachtet werden. Je stärker die Verhandlungsmacht einzelner Partner in der SC ist, desto mehr verändert sich der verhandlungsbasierte Ansatz hin zur traditionellen Art der sequenziellen Planung.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Instrumenten umfasst das Supply Chain Scheduling (SCS) alle Funktionsbereiche der operativen Managementebene. Auf dieser operativen Ebene schließt es alle Planungsaktivitäten zur Koordination von Entscheidungen innerhalb der Lieferkette ein und stellt damit selbst kein einzelnes SCM-Instrument dar sondern repräsentiert eine Gruppe von SCM-Instrumenten (vgl. [Hall und Potts, 2003] und [Dawande, et al., 2006]). Dabei werden bei den Planungsaktivitäten verschiedene Faktoren bei der operativen Planung wie beispielsweise Liefertermine und die Auslastung von Produktionskapazitäten berücksichtigt [Agnetis et al., 2006]. Dadurch entstehen einzelne Planungsprobleme, die es hinsichtlich der Gesamtkosten, der Summe der Rüstzeiten oder der Liefertermintreue und weiterer Kennzahlen zu optimieren gilt [Kreipl und

Pinedo, 2004]. Um dies zu erreichen, können die vorgestellten Instrumente des SCM wie beispielsweise das CP oder die integrierte Planung zum Einsatz kommen.

Im Gegensatz zum SCS werden bei dem ebenfalls in der Literatur gebräuchlichen Instrument des Supply Chain Planning (SCP) Planungsprobleme im Zusammenhang betrachtet, deren Bestandteile jeweils einer anderen Managementebene zugerechnet werden [Mattfeld und Huth, 2009]. Auf Grund der Betrachtung mehrerer Planungsebenen und des sich daraus ergebenden grundlegenden Unterschieds zur hier verwendeten integrierten Planung, wird das SCP nicht weiter berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Supply Chain Synchronisation und dem Collaborative Planning die Verhandlungsmacht bzw. Dominanz einzelner Unternehmen oder die Führerschaft eines Unternehmens eine wesentliche Rolle einnehmen. Das Supply Chain Planning fokussierte bei der Lösung von Planungsproblemen auf mehrere Managementebenen. In diesen genannten Punkten unterscheiden sich diese Instrumente von der Definition der integrierten Planung, so wie sie oben angegeben wurde und in dieser Arbeit verstanden wird.

4.1.4 Zielsystem, Zielkonflikte und Verbesserungspotenzial der integrierten Planung

In den Abschnitten 2.1.1 sowie 3.1.1 wurden die Ziele bzw. die Zielsysteme der einzelnen Teilbereiche erläutert. Diese beiden unterschiedlichen Zielsysteme werden in diesem Abschnitt zu einem Zielsystem für die integrierte Planung beider Teilbereiche zusammengeführt, die dabei bestehenden Zielkonflikte erläutert sowie das in der Literatur ausgewiesene Verbesserungspotenzial dargestellt.

Zielsytem

Die Aufstellung eines Zielsystems für das integrierte Problem der Produktions- und Transportplanung beginnt mit der Verdeutlichung und Analyse der Zielsysteme der einzelnen Teilbereiche. Die Produktionsplanung ist bestrebt, für die vorhandenen Produktionsmaschinen eine möglichst hohe Auslastung sowie ein hohe Termintreue zu erreichen und dabei die Anzahl der Rüstvorgänge sowie die Bestände und die Durchlaufzeit zu minimieren [Kurbel, 2005]. Die Ziele der Transportplanung bestehen in der Minimierung der insgesamt zurückzulegenden Entfernung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen [Vahrenkamp et al., 2012] und damit in der Minimierung der aus Fracht- sowie Umschlags- und Lagerkosten bestehenden Transportkosten. Um dies zu erreichen, muss die Auslastung der vorhandenen Transportkapazitäten maximiert, die Anzahl der Umschlagsvorgänge minimiert werden.

Trotz der hohen inhaltlichen Übereinstimmung der beiden Zielsysteme (Maximierung der Auslastung, Minimierung der Durchlaufzeiten, Minimierung der Bestände, etc.) entstehen bei der integrierten Betrachtung der Teilbereiche Zielkonflikte. Dies ist dadurch zu begründen, dass eine hohe Zielerreichung bei einem Teilbereich zu einer Reduzierung der Zielerreichung beim jeweils anderen Teilbereich führt [Blumenfeld et al., 1991]. Auf Grund der Gegensätzlichkeit der einzelnen Zielsysteme und der daraus entstehenden Zielkonflikte ist es notwendig, die einzelnen Zielkriterien beider Teilbereiche im Sinne einer Problem übergreifenden Betrachtung zusammenzuführen. Dazu ist es unumgänglich, die bisher gegenseitig voneinander abhängigen Zielkriterien zu entkoppeln und eine neutrale Basis für die integrierte Betrachtung zu schaffen. Dazu bietet sich die Überführung von Prozesskennzahlen in monetäre Größen an. So kann das Ziel einer hohen Termintreue auch als Minimierung der Kosten für verfrühte bzw. verspätete Lieferungen angesehen werden. Das Ziel einer kurzen Durchlaufzeit bzw. einer kurzen Transportzeit sowie geringer Bestände lassen sich monetär auch als Minimierung des im Prozess befindlichen und dadurch gebundenen Kapitals ausdrücken

[Scholz-Reiter et al., 2012]. Eine hohe Auslastung von Produktionsmaschinen und Transportkapazitäten ist gleichbedeutend mit der Minimierung der stückbezogenen Kosten des Produktions- bzw. Transportprozesses. Bei der integrierten Betrachtung werden ökonomische Größen als neutrales Bewertungskriterium zur Beurteilung der Zielerreichung herangezogen. Folglich besteht das Ziel der integrierten Betrachtung in der Minimierung der Gesamtkosten des entsprechenden Systems. Neben diesen Zielkriterien rücken zunehmend auch ökologische Zielkriterien in den Fokus der Betrachtungen (vgl. [Florian et al., 2010] und [Preuss und Hellingrath, 2010]), die in dieser Arbeit aber nicht berücksichtigt werden sollen.

Nach der Zusammenführung der Zielsysteme beider Teilbereiche ergibt sich das in der Abbildung 20 dargestellte Zielsystem der integrierten Planung. Daraus ist erkennbar, dass eine hohe Termintreue sowie eine kurze Gesamtdurchlaufzeit als prozessbedingte Ziele angestrebt werden. Hinsichtlich der Logistikkosten sind bei integrierter Betrachtung niedrige Gesamtprozesskosten, die über eine hohe Auslastung der Produktions- und Transportkapazitäten erreichet werden, sowie geringe Kapitalbindungskosten anzustreben. Dabei ergeben sich letztere aus geringen Beständen sowie einer Minierung der Leerfahrten, bei denen die ungenutzten Transportkapazitäten als gebundenes Kapital betrachtet werden können.

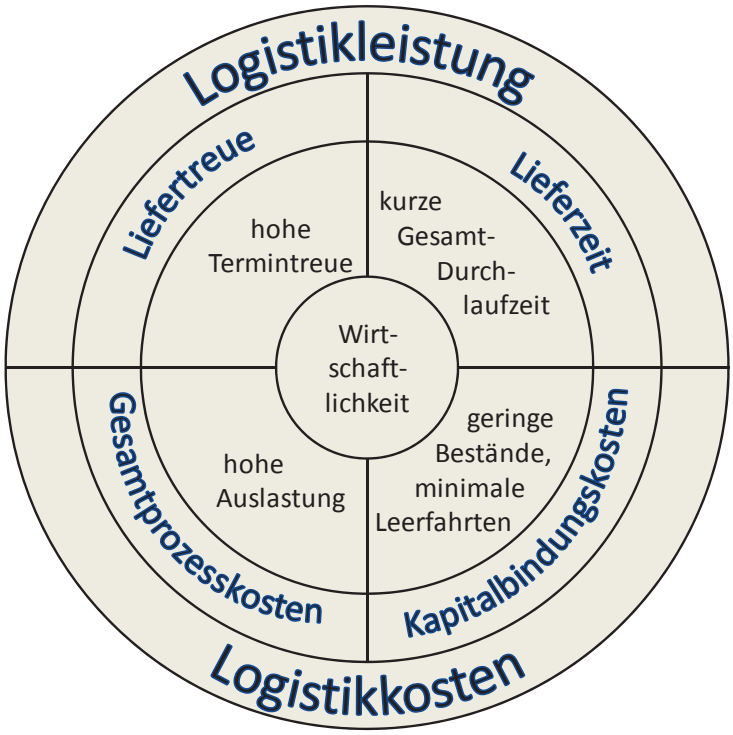


Abbildung 20: Zielsystem der integrierten Planung

In der Abbildung 20 sind sowohl Logistikkosten als auch die Logistikleistung ausgewiesen, wobei letztere als Prozesskennzahlen formuliert wurden. Diese können wie oben beschrieben im Zuge einer übergreifenden Optimierung ebenfalls über monetäre Größen ausgedrückt werden. Zusammengefasst besteht das Zielsystem der integrierten Betrachtung von Produktionsplanung und Transportplanung auf operativer Ebene darin, beide Teilbereiche im Zuge der Planung so aufeinander abzustimmen, dass eine möglichst hohe Logistikleistung erreicht werden kann und gleichzeitig die Gesamtkosten des betrachteten Gesamtsystems minimiert werden [Archetti et al., 2011].

Zielkonflikte

Das gemeinsame Ziel aller bei der integrierten Betrachtung einbezogenen Partner besteht in der Erhaltung oder Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Lieferkette. Auf Grund der Gegensätzlichkeit der Zielsysteme der einzelnen Teilbereiche existiert bei der integrierten Betrachtung des Problems dennoch ein Zielkonflikt. Die beteiligten Unternehmen agieren als Akteure dieser Lieferkette wirtschaftlich und rechtlich eigenständig und verfolgen entsprechende Ziele [Chen und Hall, 2007]. Diese drücken sich dadurch aus, dass jedes Unternehmen bestrebt ist, die Entscheidungen zu treffen, die den eigenen Gewinn maximieren [Yeung et al., 2011]. Diese Entscheidungen drücken sich in Planungsergebnissen aus, die die Planungsprämissen für den jeweiligen Bereich so gut wie möglich erfüllen [Agnetis et al., 2006]. Wenn diese jeweils sehr guten Planungsergebnisse für alle Partner in der Lieferkette umgesetzt werden können und dadurch das Gesamtplanungsergebnis für die Supply Chain verbessert werden kann, entsteht eine Win-win-Situation. Allerdings kann es im Unternehmensgefüge einer Lieferkette mit einem übergeordneten Ziel und auf Grund der gegenläufigen Abhängigkeiten in der Zielerreichung dazu kommen, dass einzelne Unternehmen im Zuge eines integrierten Ansatzes ihre eigenen Ziele nicht erreichen können [Chen und Hall, 2007]. Dadurch entstehen Zielkonflikte zwischen den Unternehmen der Lieferkette.

Im praktischen Umfeld wird dieser Zielkonflikt unter anderem durch die Verhandlung interner Verrechnungspreise [Stadtler, 2008] oder mit Hilfe der Vertragsgestaltung gelöst [Cachon, 2003]. Die entstehenden Zielkonflikte können auch über Kompensationszahlungen innerhalb der Lieferkette gelöst werden [Stadtler, 2008] damit alle Partner am generierten Gewinn der Lieferkette partizipieren können. Letzteres ist wesentlich für die langfristige Stabilität und damit für den Erfolg der Lieferkette, da andernfalls die Unternehmen die Lieferkette verlassen würden, deren Ziele nicht erreicht werden können [Müller und Riedel, 2006]. Entsprechende Verfahren und Methoden zur Ermittlung und Verteilung von Kompensationszahlungen werden in der Literatur unter dem Begriff Cost-Benefit-Sharing diskutiert (vgl. [Hirthammer und Riha, 2005], [Bensel et al., 2008], [Hombergs und Riha, 2008] und [Riha, 2009]). Sowohl die Einführung von Verrechnungspreisen als auch von Kompensationszahlungen führt nicht zu einer optimierten Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Das Gesamtplanungsergebnis ist weiterhin suboptimal wenn lediglich zusätzliche Aufwände einzelner Partner vergütet oder entstandene Gewinne in der Lieferkette anders verteilt werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der Absprachen hinsichtlich der Auftragseinplanung zwischen der Produktions- und der Transportplanung [Stadtler, 2008]. Die dadurch erzielten Planungsergebnisse werden im praktischen Umfeld in der Regel von der Verhandlungsmacht einzelner Akteure beeinflusst. Diese ergibt sich aus dem Kostenanteil, den das beteiligte Unternehmen zum Endprodukt beiträgt und aus der Marktmacht, die sich beispielsweise aus einer Monopolstellung eines Unternehmens ergibt.

Auf Grund der erläuterten Umstände wird in dieser Arbeit von einer ausgeglichenen Kostenstruktur zwischen Produktion und Transport und darüber hinaus von einer gleichberechtigten Beziehung zwischen Produktion und Transport ausgegangen. Durch diese Annahme sind interne Verrechnungspreise oder Kompensationszahlungen nicht notwendig und es ist möglich, die Verhandlungsmacht einzelner Akteure zu vernachlässigen. Cost-Benefit-Sharing oder verhandlungsbasierte Ansätze zur Abstimmung von Planungsproblemen zwischen verschiedenen Akteuren werden somit nicht in dieser Arbeit betrachtet. Dadurch rückt die integrierte Betrachtung der beiden Teilprobleme, so wie sie in dieser Arbeit definiert ist, in den Fokus der Untersuchungen.

Verbesserungspotenzial

Wie bereits erläutert, besteht das Ziel einer integrierten Planung in der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Lieferkette durch die verbesserte Nutzung der vorhandenen Ressourcen bei unternehmensübergreifenden Betrachtung. Zur Quantifizierung dieses Verbesserungspotenzials muss ein Leistungsvergleich der Ergebnisse der integrierten Planungsansätze mit den Ergebnissen der herkömmlichen sequenziellen Vorgehensweise durchgeführt werden. In der Literatur wurde für die Mehrzahl der existierenden Planungsansätze lediglich der Nachweis der Funktionsfähigkeit erbracht. Die durchgeführten Betrachtungen hinsichtlich des Verbesserungspotenzials sind in ihrer Anzahl bisher unzureichend [Chen, 2010]. Die wenigen dazu durchgeführten Untersuchungen zeigen ein vielversprechendes Verbesserungspotenzial der integrierten Planungsansätze gegenüber den untersuchten sequenziellen Lösungsverfahren hinsichtlich der operativen Kosten von durchschnittlich bis zu 20 % (vgl. [Chandra und Fisher, 1994], [Chen und Vairaktarakis, 2005], [Pundoor und Chen, 2005] und [Geismar et al., 2008]) bzw. sogar mehr als 23 % [Boudia und Prins, 2009].

Allerdings muss bei der Angabe des Verbesserungspotenzials das zugrunde liegende integrierte Planungsmodell sowie die Auswahl des sequenziellen Lösungsverfahrens berücksichtigt werden. In beiden Punkten unterscheiden sich die angegebenen Autoren voneinander, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander auf Grund der mangelnden Übereinstimmung nicht gegeben ist. Die Unterschiedlichkeit integrierter Planungsmodelle wird in folgenden Abschnitten thematisiert.

4.1.5 Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle

Integrierte Planungsmodelle bestehen aus einem Modell für das Teilproblem der Produktionsplanung und einem Modell für das Teilproblem der Transportplanung. Wie in den bisherigen Ausführungen gezeigt werden konnte, existieren für beide Teilprobleme eine Vielzahl von Modellparametern. Die Unterschiedlichkeit der einzelnen Planungsmodelle ergibt sich aus der Ausgestaltung der betrachteten Szenarien der Teilprobleme hinsichtlich der Modellparameter und Restriktionen. Aus den Kombinationsmöglichkeiten der Modellparameter der beiden Teilbereiche ergibt sich bei der Betrachtung eines integrierten Planungsmodells eine sehr großes Variantenspektrum. Existierende Planungsansätze wurden in den meisten Fällen für eine spezielle Konstellation von Modellparametern entwickelt und weisen folglich auch unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte auf.

Durch Liu (2003) wurden existierende Übersichtsarbeiten von Bhatnangar et al. (1993), Thomas und Griffin (1996), Vidal und Goetschalckx (1997), Baita und Ukovich (1998) und Erengüç et al. (1999) untersucht und eine erste Einteilung hinsichtlich der unterschiedlichen Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle vorgenommen. Die Abbildung 21 zeigt diese Einteilung in Anlehnung an Liu (2003).

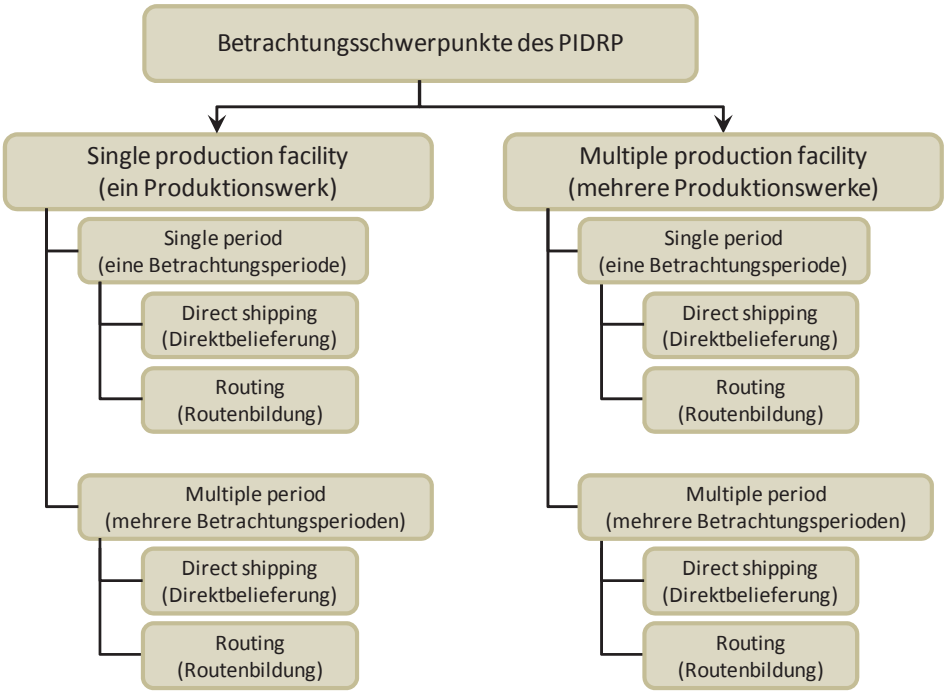


Abbildung 21: Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle

Mit Hinblick auf das im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete Szenario wird nachfolgend nur der linke Zweig der Abbildung 21 betrachtet. Bei dem gewählten Szenario handelt es sich um die Betrachtung einer Produktionsstätte über mehrere Perioden. Entsprechend dieser Einschränkung der Betrachtungsschwerpunkte wurde eine Anzahl von Modellen mit den dazu entsprechenden Lösungsverfahren von verschiedenen Autoren untersucht. Ziel dieser Untersuchung war es, eine weitere Detaillierung der Betrachtungsschwerpunkte vornehmen zu können und darauf aufbauend Lösungsverfahren für einen Leistungsvergleich zu identifizieren.

Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass eine weitere Detaillierung der Betrachtungsschwerpunkte hinsichtlich der beiden Dimensionen Maschinenkonfiguration und Transportmodus erfolgen konnte. Bei der Maschinenkonfiguration kann zwischen Autoren unterschieden werden, welche die Produktionsstätte mit einer 1-Maschinen Produktion gleichsetzen (single machine). Dadurch verändert sich die Natur des Produktionsplanungsproblems von einem Maschinenbelegungsproblem hin zu einem Losgrößenproblem. Darüber hinaus gibt es eine Gruppe von Autoren, die mehrere parallele Maschinen oder eine bundling Anordnung bzw. einen Flow-Shop innerhalb der Produktionsstätte betrachten. Bei der bundling Anordnung nach Li und Vairaktarikis (2007) besteht jeder Auftrag aus einer Menge von voneinander unabhängigen Produktionsschritten (tasks), die den entsprechenden Maschinen zugeordnet sind und von diesen bearbeitet werden können. Nach Abschluss der Bearbeitung werden die Aufträge zusammengeführt und zusammen ausgeliefert.

Hinsichtlich des Transportmodus erfolgte eine Einordnung der Modelle in Anlehnung an Chen (2010) in drei Gruppen. Danach werden Modelle unterschieden, bei denen ein individueller und unverzüglicher Transport oder ein Direkttransport bzw. ein Routing stattfindet. Das wesentliche Kennzeichen des individuellen und unverzüglichen Transports liegt darin, dass die fertiggestellten Aufträge direkt nach der Bearbeitung einzeln und ohne Zwischenlagerung ausgeliefert werden. Beim Direkttransport hingegen werden mehrere Aufträge eines Kunden gesammelt und zusammen

ausgeliefert. Im Gegensatz dazu werden beim Routing auch Aufträge, die zu unterschiedlichen Kunden gehören, zusammen ausgeliefert.

Die Abbildung 22, bei der die Betrachtungsschwerpunkte der Modelle unterschiedlicher Autoren den Ausprägungen der beiden Dimensionen Maschinenkonfiguration und Transportmodus zugeordnet sind und die nachfolgende kurze Charakterisierung der jeweiligen Modelle stellen das Ergebnis dieser Untersuchung dar.

Auf Grund der hohen Anzahl an Modellparametern ist eine weitere Detaillierung der Betrachtungsschwerpunkte möglich, was allerdings zu einer hochdimensionalen Darstellung führen würde und deshalb hier nicht betrachtet werden soll.

Maschinen-konfiguration / **Transportmodus**	Single Machine	Parallele Maschinen	Bundling	Flow-Shop
Individueller und unverzüglicher Transport	[Potts, 1980] [Zdrzalka, 1991] [Hall und Shomys, 1992] [Zdrzalka, 1995] [Woeginger, 1998] [Hoogeveen und Vestjens, 2000] [van den Akker et al., 2000] [Liu und Cheng, 2002] [Mastrolilli, 2003] [Wang und Lee, 2005]	[Woeginger, 1994] [Gharbi und Haouari, 2002] [Mastrolilli, 2003]		[Kaminsky, 2003]
Direkttransport	[Hall und Potts, 2003] [Pundoor und Chen, 2005] [Li et al., 2005a] [Averbakh und Xue, 2007] [Mazdeh et al., 2007] [Stecke und Zhao, 2007] [Chen und Lee, 2008] [Mazdeh et al., 2008] [Li und Yuan, 2009] [Averbakh, 2010]		[Li und Vairaktarikis, 2007]	
Routing	[Chang und Lee, 2004] [Chen und Vairaktarikis, 2005] [Li et al., 2005a]	[Chen und Vairaktarikis, 2005] [Ullrich, 2013]	[Li und Vairaktarikis, 2007]	

Abbildung 22: Detaillierung der Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsverfahren

Individueller und unverzüglicher Transport

Die Arbeit von Potts (1980) war eine der ersten Arbeiten, bei der während der Produktionsplanung eines 1-Maschinen-Problem explizit jobabhängige Transportaspekte berücksichtigt wurden. Jedem Auftrag, der nach Bearbeitung sofort ausgeliefert wurde, ist dabei ein Verfügbarkeitszeitpunkt (release date), eine Bearbeitungszeit und eine zielabhängige Transportzeit zugeordnet. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Ermittlung einer Bearbeitungsreihenfolge, bei der die Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge minimiert wird. Hall und Shmoys (1992) und Mastrolilli (2003) greifen dieses Szenario von Potts (1980) für eigene Untersuchungen auf ohne die Betrachtungsschwerpunkte zu verändern. Weitere Autoren verwenden ebenfalls dieses Szenario, führen jedoch Modifikationen ein wie beispielsweise die Ermöglichung einer Auftragsunterbrechung (vgl. [Liu und Cheng, 2002]) oder die Vernachlässigung von release dates und die Einführung von auftragsspezifischen Rüstzeiten (vgl. [Zdrzalka, 1991], [Zdrzalka, 1995] und [Woeginger, 1998]) oder

die Einführung von Strafkosten bei verspäteter Lieferung (vgl. [Wang und Lee, 2005]). Woeginger (1994) und Gharbi und Haouari (2002) erweiterten das Planungsproblem von Potts (1980) durch die Einführung mehrerer paralleler Maschinen.

Hoogeveen und Vestjens (2000) sowie van den Akker et al. (2000) untersuchen ein Single-Maschinen Online-Schedulingproblem. Charakteristisch für das Online-Scheduling ist, dass die zu bearbeitenden Aufträge erst mit fortschreitender Zeit eintreffen und deshalb sowohl die Auftragsanzahl als auch die release dates und die Liefertermine erst mit dem Auftragseingang bekannt sind. Kaminsky (2003) untersuchte sowohl die Offline als auch die Online-Scheduling Version eines Flow-Shops, bei dem jeder Auftrag eine vorher definierte Bearbeitungsreihenfolge einhalten muss.

Direkttransport

Mazdeh et al. (2007) sowie Chen und Lee (2008) betrachten ein ähnliches Modell wie Wang und Lee (2005) erlauben allerdings eine Konsolidierung von Transportaufträgen um die gesamten Transportkosten zu minimieren. Dieses Ziel wird auch von Stecke und Zhao (2007) verfolgt, das durch die Einführung von internen Fälligkeitsterminen für den Produktions- und den Transportbeginn jedes Auftrags erreicht werden soll. Mazdeh et al. (2008) erweiterten das Problem um die Annahme von auftragsspezifischen release dates. Li und Yuan (2009) sowie Li et al., (2005a) betrachten ebenfalls die Konsolidierung von Transportaufträgen in ihren Modellen, unterstellen aber im Gegensatz zu Chen und Lee (2008) lediglich ein verfügbares Transportfahrzeug mit beschränkter Kapazität.

Averbakh und Xue (2007) und Averbakh (2010) betrachteten die Online-Scheduling Variante dieses Problems und erweiterten es um die Annahme, dass die Auftragsbearbeitung unterbrochen werden darf. Hall und Potts (2003) sowie Pundoor und Chen (2005) betrachten in ihrem Modell die Begrenzung der Auftragsanzahl innerhalb eines Transportauftrags und unterstellen weiterhin in einer weiteren Variante ihres Modells einen Fälligkeitstermin für jeden einzelnen Auftrag.

Li und Vairaktarakis (2007) widmeten sich einem Szenario mit zwei Maschinen und dem bereits angesprochenen Bundling-Problem, bei dem ein Auftrag aus zwei tasks besteht und task 1 auf Maschine 1 und task 2 auf Maschine 2 bearbeitet werden muss. Fertige Aufträge können mit anderen Aufträgen des gleichen Kunden konsolidiert werden. Für den Transport zu den Kunden stehen eine unbegrenzte Anzahl von Transportfahrzeugen zur Verfügung, deren jeweilige Ladekapazität allerdings beschränkt ist.

Routing

Im Unterschied zu den bisher betrachteten Modellen ist das Teilproblem der Transportplanung unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass nicht nur ausschließlich eine Direktbelieferung vorgesehen ist sondern auch die Zusammenfassung von Aufträgen verschiedener Kunden innerhalb einer Tour. Li et al., (2005a) sowie Li und Vairaktarakis (2007) betrachten in ihren Modellen das dadurch entstandene Routing-Problem. Chen und Vairaktarakis (2005) untersuchen dies in ihren Modellen sowohl für das Single-Maschinen als auch für die Parallel-Maschinen Variante ihres Szenarios. Chang und Lee (2004) unterstellen in ihrem Modell, dass verschiedene Kunden geografisch sehr nah beieinander liegen und fassen diese zu einer Kundenregion zusammen, die durch ein Transportfahrzeug beliefert wird. Darüber hinaus unterstellen die Autoren, dass Aufträge unterschiedlicher Größe auch eine unterschiedlich große Kapazität auf dem Transportfahrzeug beanspruchen. Diese Annahme wird durch Ullrich (2013) in seinem Modell aufgegriffen und um unterschiedliche Verfügbarkeitszeiten der einzelnen Maschinen und Transportfahrzeuge ergänzt,

wobei letztere jeweils eine begrenzte Kapazität aber diesbezüglich keine Homogenität aufweisen. Weiterhin wurden kundenindividuelle Servicezeiten für die Entladung berücksichtigt.

Zusammenfassung

Durch die Untersuchung der Betrachtungsschwerpunkte integrierter Planungsmodelle konnte gezeigt werden, dass eine Vielzahl von Modellparametern verschiedener Ausprägung existiert, woraus sich nahezu unüberschaubare Kombinationsmöglichkeiten ergeben. Diese Unterschiedlichkeit verhindert eine direkte Vergleichbarkeit der von den unterschiedlichen Autoren entwickelten Lösungsverfahren. Statt dessen ist es notwendig, bei der Anwendung eines bereits vorhandenen Lösungsverfahrens die Modellannahmen zu untersuchen und die Übertragbarkeit des Lösungsverfahrens zu prüfen.

Auf der Grundlage dieser durchgeführten Untersuchung konnten mögliche Lösungsverfahren für einen Leistungsvergleich identifiziert werden, deren jeweiliges Lösungsprinzip im Abschnitt 4.4 detaillierter betrachtet wird. Weiterhin wurde das im nachfolgenden Abschnitt vorgestellte Repräsentationsschema zur Klassifikation integrierter Planungsmodelle entwickelt, das eine einfachere Handhabbarkeit der Modellparameter gewährleisten soll. Darüber hinaus bildete diese Untersuchung die Basis für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und im Abschnitt 4.2 vorgestellte Standardproblem der integrierten Planung von Produktion und Transport.

4.1.6 Klassifikation integrierter Planungsmodelle

In Analogie zu den Teilproblemen ergibt sich auch bei der Betrachtung des integrierten Planungsproblems die Notwendigkeit einer Klassifikation von Planungsmodellen. Dadurch ist es möglich, schnell und ohne eine detaillierte Untersuchung der zu beurteilenden Modelle eine Aussage über die Anwendbarkeit der entsprechenden Lösungsverfahren treffen zu können. Nachfolgend werden die bisher existierenden Klassifikationen sowie eine im Zuge dieser Arbeit entstandene Klassifikation vorgestellt.

In Anlehnung an die Klassifikation der Planungsmodelle bei den einzelnen Teilproblemen wurde von Chen (2010) eine Klassifikation integrierter Planungsmodelle entwickelt. Diese basiert auf der von Graham et al. (1979) entwickelten Klassifikation für Produktionsplanungsmodelle und wurde um zwei Felder zur Beschreibung der Modellparameter für das Teilproblem der Transportplanung erweitert. Damit ergibt sich für die Beschreibung integrierter Planungsmodelle nach Chen (2010) eine fünf-Felder-Notation ($\alpha \mid \beta \mid \pi \mid \delta \mid \gamma$). Dabei sind die ersten beiden Felder für die Beschreibung von Produktionsparametern (Maschinenkonfiguration (α); Auftragsparameter (β)) und die beiden nachfolgenden Felder für die Beschreibung von Transportparametern (Lieferparameter (π); Kundenanzahl (δ)) vorgesehen. Das letzte Feld dient der Charakterisierung der Zielfunktion (γ).

Die Ausprägungen der Modellparameter für das Teilproblem der Produktionsplanung sowie die Beschreibung der Zielfunktion entsprechen den Ausführungen von Lawler et al. (1993) und Pinedo (2012), die wiederum auf der Arbeit von Graham et al. (1979) beruhen. Für das Teilproblem der Transportplanung wurden Lieferparameter definiert, die sich aus einer Beschreibung der Fahrzeugcharakteristika (Anzahl verfügbarer Lieferfahrzeuge und deren Kapazitätsbeschränkungen) sowie der Art der Belieferung (Direktbelieferung oder eine Belieferung im Rahmen einer Auslieferungstour) zusammensetzt. Die Ausprägungen des Transportparameters Kundenanzahl begrenzt sich auf die beiden Möglichkeiten, dass entweder ein Kunde oder mehrere Kunden berücksichtigt werden, denen jeweils unterschiedliche Aufträge zugeordnet wurden.

Durch einen Vergleich zwischen der oben erläuterten Klassifikation zur Beschreibung von Transportplanungsmodellen und den Möglichkeiten, die Chen (2010) durch die Erweiterung der drei-Felder-Notation vorgibt, wird deutlich, dass Letztere nicht für eine umfassende Charakterisierung integrierter Planungsmodelle ausreichend ist. Es gibt eine Vielzahl von Modellparametern, die nicht unter Verwendung der von Chen (2010) vorgestellten fünf-Felder-Notation abgebildet werden können. Dazu zählt beispielsweise die Stufigkeit der Distributionsstruktur sowie ein zwischen der Produktion und dem Transport angeordneter Speicher, der bereits fertig produzierte und für den Transport bereitgestellte Güter für einen kurzen Zeitraum bis zur Verladung aufnimmt. In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Transportressourcen übernimmt dieser Speicher die Funktion einer Warteschlange oder eines Zwischenlagers, der nicht für eine längerfristige Lagerung vorgesehen ist. Dennoch verbraucht dieser Speichervorgang ebenfalls Ressourcen und stellt einen Kostenfaktor dar. Bei den Ressourcen handelt es sich hauptsächlich um die erforderliche Fläche und Zeit, die bei der Berechnung der Durchlaufzeit berücksichtigt werden muss.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit von Meinecke und Scholz-Reiter (2014a) ein Repräsentationsschema zur Beschreibung integrierter Planungsmodelle entwickelt, mit Hilfe dessen eine Klassifikation vorgenommen werden kann und das im Folgenden vorgestellt wird. Diese Klassifikation beruht für die Beschreibung der Produktionsparameter auf der Arbeit von Graham et al. (1979), die um ökonomische Modellierungsparameter erweitert wurde. Für die Charakterisierung der Transportparameter wird die oben angegebene Klassifikation mit den ebenfalls in dieser Arbeit durchgeführten Erweiterungen verwendet. Diese beiden Klassifikationen werden zusammengeführt und um die Berücksichtigung der Modellierungsparameter eines kurzfristigen Speichers ergänzt. Die Modellparameter dieses Speichers ergeben sich aus einer Kapazitätsbeschränkung (TS1) und einer zeitlichen Beschränkung der Speicherdauer der einzelnen zwischengelagerten Güter (TS2) sowie der Berücksichtigung der Lagerkosten (TS3) als ökonomischer Komponente. Damit ergeben sich die in der Abbildung 23 dargestellten Modellparameter für die Klassifikation integrierter Planungsmodelle nach Meinecke und Scholz-Reiter (2014a). Für die Ausprägungen der einzelnen Parameter sei auf die Anhänge 3 bis 5 verwiesen.

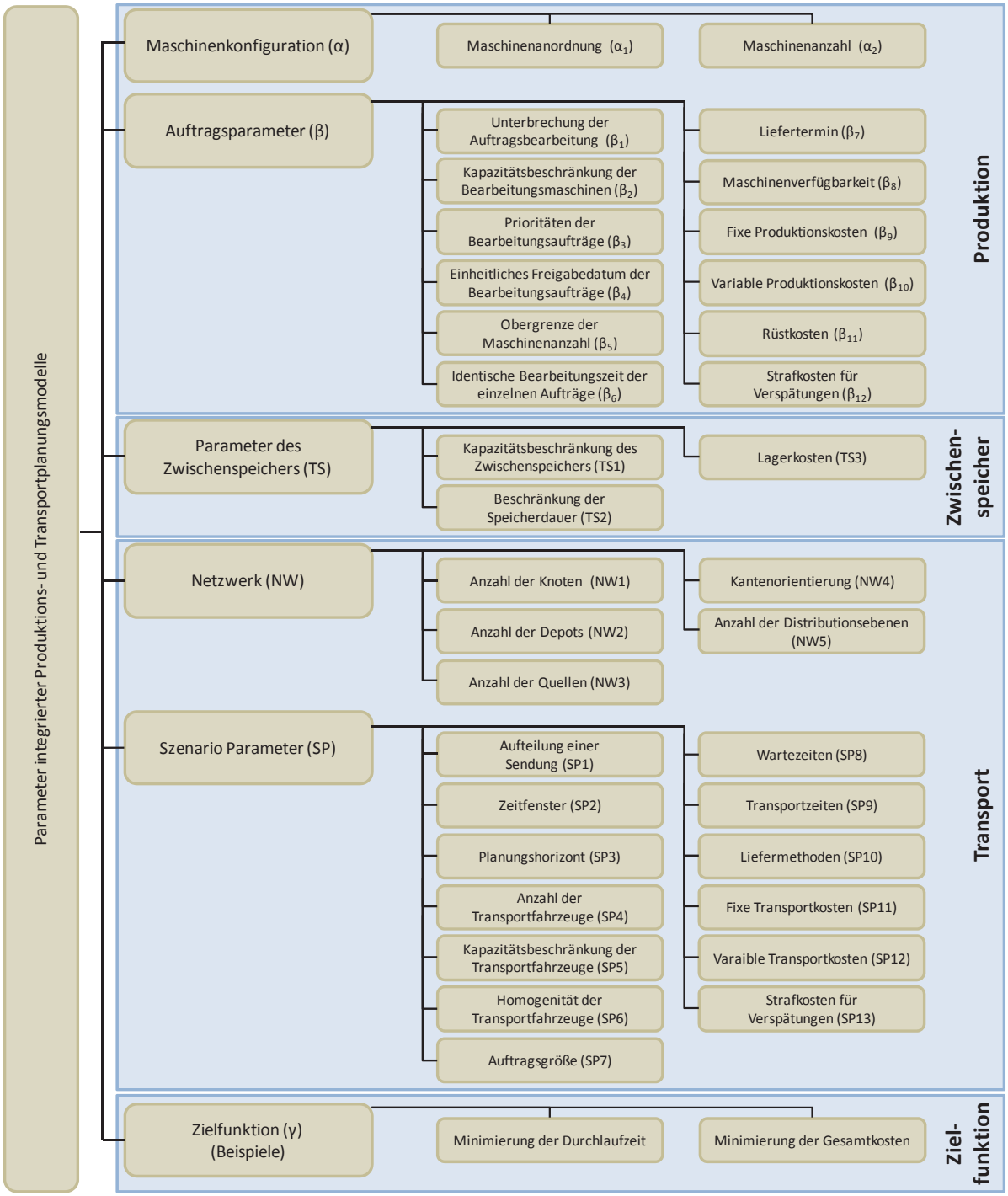


Abbildung 23: Klassifikation integrierter Produktions- und Transportplanungsmodelle

Entsprechend dieser Abbildung ergibt sich für die Klassifikation eines Planungsmodells ein Tupel, das sich entsprechend des folgenden Schemas zusammensetzt:

$$\overbrace{\alpha|\beta}^{\text{Produktion}}\ \overbrace{\text{TS}}^{\text{Zwischenspeicher}}\ \overbrace{\text{NW}|\text{SP}}^{\text{Transport}}\ \overbrace{\gamma}^{\textit{Zielfkt.}}$$

$$\left(\left[\alpha_1,\ \alpha_2|\beta_1,\ \beta_2,\ ..,\ \beta_{12}\right]\left[\text{TS1, TS2, TS3}\right]\left[\text{NW1, NW2, .., NW5}|\text{SP1, SP2, .., SP13}\right]\left[\ \gamma\ \right]\right)$$

Diese Klassifikation wird im folgenden Abschnitt exemplarisch auf das von Meinecke und Scholz-Reiter (2014) entwickelte Standardproblem der integrierten Planung sowie im weiteren Verlauf der Arbeit auf einige ausgewählte integrierte Planungsmodelle angewendet.

4.2 Das Standardproblem der integrierten Planung

Wie bereits bei den vorangegangenen Ausführungen zur Klassifikation deutlich geworden ist, finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Modellen zur Betrachtung des integrierten Problems der Produktions- und Transportplanung (vgl. [Meinecke und Scholz-Reiter, 2014a], [Chen, 2010]). Jedes dieser Modelle basiert auf einem Planungsmodell, dass sich von den anderen Modellen unterscheidet. Die fehlende Vergleichbarkeit der den Planungsansätzen zugrunde liegenden Modelle verhinderte einen Leistungsvergleich der bisher entwickelten integrierten Lösungsverfahren untereinander. Folglich weisen auch die darauf basierenden Planungsprobleme entsprechende Unterschiede auf. Zur Vereinheitlichung dieser unterschiedlichen Planungsprobleme und für eine bessere Vergleichbarkeit der Lösungsqualität wurde von Meinecke und Scholz-Reiter (2014) ein Standardproblem für das IPODS-Problem entwickelt und auf eine konkrete Problemstellung angewendet. Dazu wurden die oben beschriebenen Standardprobleme der Produktionsplanung und der Transportplanung sowie die bestehenden integrierten Planungsprobleme hinsichtlich der unterstellten Modellparameter, deren Ausprägungen und deren Zielfunktion untersucht, zusammengeführt und erweitert. Dieses Standardproblem dient als Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit. Im Folgenden wird das Standardproblem der integrierten Planung von Produktion und Transport nach Meinecke und Scholz-Reiter (2014) detailliert vorgestellt.

Für die Entwicklung des Standardproblems der integrierten Planung wurde auf die existierenden Standardprobleme der Produktionsplanung in der Werkstattfertigung und der Transportplanung zurückgegriffen und deren Modellannahmen übernommen. Damit entspricht die verbale Beschreibung der jeweiligen Teilprobleme des Standardmodells den obigen Ausführungen. Auf eine Wiederholung soll daher an dieser Stelle verzichtet werden. Da sich diese beiden Standardprobleme sowohl aus der Prozesssicht als auch aus der formal mathematischen Betrachtung heraus nicht einfach aneinanderfügen lassen, sind entsprechende Änderungen und Erweiterungen notwendig, die im Folgenden vorgestellt werden.

Aus prozessualer Sicht werden die beiden Standardprobleme durch die Einführung eines Zwischenspeichers verbunden [Wang, 2012]. In diesem Zwischenspeicher werden die fertig produzierten Güter für einen kurzen Zeitraum bis zum Beginn der Verladung und dem sich anschließenden Transport aufbewahrt. Der Zwischenspeicher verfügt über eine begrenzte Kapazität, dessen Nutzung Kosten verursacht. Eine Lagerung mit den dazu gehörigen Ein- und Auslagervorgängen ist dabei nicht vorgesehen und entspricht auch nicht dem Charakter eines kurzfristigen Zwischenspeichers. Damit stellt der Zwischenspeicher das verbindende Glied in der Materialflusskette dar. (vgl. [Cohen und Lee, 1988] und [Fumero und Vercellis, 1999])

Eine weitere wesentliche Erweiterung zur Verknüpfung der beiden Standardprobleme und des Zwischenspeichers ist die Herstellung eines Bezugs zwischen den Planungsobjekten der einzelnen Standardprobleme. Für die Produktionsplanung stellen die Jobs sowie die Maschinen und für die Transportplanung die Knoten und Touren die Planungsobjekte dar. Bei einer integrierten Betrachtung erfolgt nun eine Zuordnung von Jobs zu Knoten. Dadurch werden die zu bearbeitenden Aufträge mit den zu beliefernden Kunden verknüpft.

Die letzte wesentliche Änderung bzw. Erweiterung ist die Einführung eines übergreifenden und universellen Kriteriums zur Messung der Leistungsfähigkeit bei einer integrierten Betrachtungsweise. Wie bereits in Abschnitt 4.1.4 beschrieben, eignet sich dafür eine monetäre Betrachtung. Neben ökonomischen Größen können damit auch Prozesskennzahlen wie beispielsweise die Durchlaufzeit oder Verspätung auch bei gegenläufigen Zielen der Teilbereiche ausgedrückt werden. Aus diesem Grund wurden Kosten als universelles Bewertungskriterium ausgewählt.

Nach dieser verbalen Beschreibung der Änderungen und Ergänzungen ergibt sich damit die formale Beschreibung des Standardproblems der integrierten Planung von Produktion und Transport nach Meinecke und Scholz-Reiter (2014). Um Wiederholungen zu vermeiden, werden an dieser Stelle nur relevante Änderungen oder Ergänzungen der formalen Darstellung der einzelnen Teilprobleme dargestellt. Diese werden anschließend zur vollständigen formalen Beschreibung des Standardproblems der integrierten Planung zusammengeführt.

Teilproblem Produktionsplanung

Die angegebene Zielfunktion für das Standardproblem der Produktionsplanung enthält keine monetären Aspekte. Diese sind aber bei einer integrierten Betrachtung wichtig für die Bewertung von Aufwänden und Erträgen. Um dies zu berücksichtigen, wird die bisherige Zielfunktion ersetzt. Die neue Zielfunktion besteht in der Ermittlung der minimalen Gesamtproduktionskosten c^{prod}. Diese setzen sich aus einem fixen und einem variablen Anteil ($c^{prodfix}$ und $c^{prod\,\mathrm{var}}$) sowie aus auftrags- und maschinenspezifischen Rüstkosten $c^{prodset}$ zusammen. Darüber hinaus entstehen Kosten für die verspätete Fertigstellung der Aufträge (Penalties) $c^{prodpen}$. Die variablen Kostenbestandteile enthalten mengen- und zeitabhängige Variablen, über die eine Optimierung mit Hilfe der binären Zuordnungsvariablen erfolgt. Damit ergibt sich formal die neue Zielfunktion, die sich wie folgt darstellt.

Zielfunktion (γ):

$$\min\left(c^{prod}\right)=\sum_{i=1}^{j}\sum_{l=1}^{m}c_{il}^{prodfix}+\sum_{i=1}^{j}\sum_{k=1}^{oi}\sum_{l=1}^{m}c_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}a_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}+\sum_{i=1}^{j}\sum_{k=1}^{oi}\sum_{l=1}^{m}c_{ikl}^{prodset}a_{ikl}^{prodset}+\sum_{i=1}^{j}c_{i}^{prodpen}a_{i}^{prodpen} \qquad (16)$$

Die oben angegebenen Nebenbedingungen sind weiterhin gültig. Durch die Umstellung der Zielfunktion auf die Minimierung der Produktionskosten ergeben sich die folgenden Erweiterungen der oben angegebenen Nebenbedingungen:

$$c_{il}^{prodfix}\geq 0 \qquad \forall i\in J \text{ und } \forall l\in M \qquad (17)$$

$$c_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}\geq 0 \qquad \forall i\in J \text{ und } \forall k\in O_i \text{ und } \forall l\in M \qquad (18)$$

$$c_{il}^{prodset}\geq 0 \qquad \forall i\in J \text{ und } \forall l\in M \qquad (19)$$

$$c_{i}^{prodpen}\geq 0 \qquad \forall i\in J \qquad (20)$$

$$a_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in J \text{ und } \forall k\in O_i \text{ und } \forall l\in M \qquad (21)$$

$$a_{ikl}^{prodset} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in J \text{ und } \forall k \in O_i \text{ und } \forall l \in M \qquad (22)$$

$$a_i^{prodpen} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in J \qquad (23)$$

Über die Ausdrücke (17) bis (20) wird sichergestellt, dass alle angegebenen Kosten nicht negativ sind und folglich auch die entsprechenden Summen nicht negativ sind (Nichtnegativitätsbedingung).

Zwischenspeicher

Der Zwischenspeicher ist für die kurzzeitige Speicherung der fertig produzierten Güter bis zur Verladung auf die Transportmittel vorgesehen. Damit stellt dieser eine Ressource mit einer begrenzten Kapazität $\kappa_{\max}^{tstor}$ dar, für dessen Nutzung auftragsabhängige Kosten c_i^{tstor} in Höhe von insgesamt c^{tstor} anfallen. Darüber hinaus gilt auch für den kurzfristigen Speicher die Lagerbilanzgleichung wonach sich der Lagerbestand der aktuellen Periode si_t aus dem Lagerbestand der vorangegangenen Periode si_{t-1} zuzüglich den Lagerzugängen in der aktuellen Periode si_t^+ und abzüglich der Lagerabgänge der aktuellen Periode si_t^- ergibt (siehe Gleichung (25)). Das Ziel es ist, unter Nutzung der Binärvariablen die mengen- und zeitabhängigen Kosten für die kurzzeitige Speicherung der fertig produzierten Güter zu minimieren. Formal ergibt sich daraus die folgende mathematische Beschreibung (vgl. [Cohen und Lee, 1988] und [Fumero und Vercellis, 1999]):

Zielfunktion (γ):

$$\min(c^{tstor}) = \sum_{i=1}^{j} c_i^{tstor} a_i^{tstor} \qquad (24)$$

Nebenbedingungen:

$$si_t = si_{t-1} + si_t^+ - si_t^- \qquad (25)$$

$$\kappa_{\max}^{tstor} \geq si_t \geq 0 \qquad (26)$$

$$c_i^{tstor} \geq 0 \qquad \forall i \in J \qquad (27)$$

$$a_i^{tstor} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in J \qquad (28)$$

Mit Hilfe des Ausdrucks (26) wird sichergestellt, dass die Kapazität des Zwischenspeichers nicht überschritten wird. Der Ausdruck (27) beschreibt, dass alle angegebenen Kosten nicht negativ sein dürfen und folglich auch die entsprechenden Summen nicht negativ sind (Nichtnegativitätsbedingung). Mit Hilfe der binären Zuordnungsvariable a_i^{tstor} wird ausgedrückt, ob für den Job i der Zwischenspeicher genutzt wurde (Ausdruck (28)).

Teilproblem Transportplanung

Die oben angegebene Zielfunktion für das Standardproblem der Transportplanung bezieht sich auf die Minimierung der Gesamttransportkosten. Da für dieses Standardproblem im Allgemeinen keine Aussage darüber getroffen wird, welche Bestandteile in den Gesamttransportkosten enthalten sind, wird die Zielfunktion dieses Teilproblems in Analogie zum Teilproblem der Produktionsplanung

weiter detailliert. Das Ziel der Minimierung der Gesamtkosten unter Verwendung der Binärvariablen bleibt dabei erhalten. Mit Hilfe der binären Zuordnungsvariable A_{T_v} wird im Ausdruck (33) beschrieben, ob eine Tour T_v durchgeführt wurde. Die binäre Zuordnungsvariable B_f im Ausdruck (34) beschreibt, ob eine Lieferung verspätet in f eintrifft und ob folglich Strafkosten entstehen. Die neue Zielfunktion besteht in der Ermittlung der minimalen Gesamttransportkosten c^{transp}, die sich aus den fixen Transportkosten $c^{transpfix}$, die für jede durchgeführte Tour T_v mit $\mathrm{T}=\{\mathrm{T}_v\}_{v=1}^{q}$ entstehen, sowie aus variablen Transportkosten $c^{transp\,\mathrm{var}}$ und aus Kosten für die verspätete Lieferung der Aufträge $c^{transppen}$ zusammensetzen. Die variablen Kostenbestandteile setzen sich wiederum aus mengen- und zeitabhängigen Bestandteilen zusammen. Formal ergibt sich daraus die folgende mathematische Beschreibung:

Zielfunktion (γ):

$$\min(c^{transp}) = \sum_{v=1}^{q} c_{T_v}^{transpfix} A_{T_v} + \sum_{(e,f)\in E} c_{ef}^{transp\,\mathrm{var}} a_{ef} + \sum_{f\in H} c_f^{transppen} * B_f \tag{29}$$

Nebenbedingungen:

$$c_{T_v}^{transpfix} \geq 0 \qquad \forall T_v \in T \tag{30}$$

$$c_{ef}^{transp\,\mathrm{var}} \geq 0 \qquad \forall (\mathrm{e,f}) \in H \tag{31}$$

$$c_i^{transppen} \geq 0 \qquad \forall i \in J \tag{32}$$

$$A_{T_v} \in \{0,1\} \qquad \forall T_v \in T \tag{33}$$

$$B_f \in \{0,1\} \qquad \forall \mathrm{f} \in H \tag{34}$$

Über die Ausdrücke (30) bis (32) wird beschrieben, dass alle angegebenen Kosten nicht negativ sein dürfen und folglich auch die entsprechenden Summen nicht negativ sind (Nichtnegativitätsbedingung).

Zusammenführung zum Standardproblem der integrierten Planung

Aus den obigen Ausführungen zu den Standardproblemen der einzelnen Teilprobleme und den dargestellten Änderungen und Ergänzungen ergibt sich das Standardproblem der integrierten Planung nach Meinecke und Scholz-Reiter (2014). Für einen Überblick über Modelle der mathematischen Programmierung sei auf Mula et al. (2010) verwiesen. Das hier entwickelte integrierte Planungsproblem enthält vereinzelt Elemente aus Cohen und Lee (1988), Fumero und Vercellis (1999), Liu (2003), Scholz-Reiter et al. (2010a), Scholz-Reiter et al. (2011a), Scholz-Reiter et al. (2011c) sowie Yeung et al. (2011), und lässt sich formal wie folgt mathematisch ausdrücken:

Zielfunktion (γ):

$$\min\left(c^{ipods}\right)=\sum_{i=1}^{j}\sum_{l=1}^{m}c_{il}^{prodfix}+\sum_{i=1}^{j}\sum_{k=1}^{oi}\sum_{l=1}^{m}c_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}a_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}+\sum_{i=1}^{j}\sum_{k=1}^{oi}\sum_{l=1}^{m}c_{ikl}^{prodset}a_{ikl}^{prodset}+\sum_{i=1}^{j}c_{i}^{prodpen}a_{i}^{prodpen}+$$
$$+\sum_{i=1}^{j}c_{i}^{tstor}a_{i}^{tstor}+ \tag{35}$$
$$+\sum_{v=1}^{q}c_{T_v}^{transpfix}A_{T_v}+\sum_{(e,f)\in E}c_{ef}^{transp\,\mathrm{var}}a_{ef}+\sum_{f\in H}c_{f}^{transppen}*B_{f}$$

Nebenbedingungen:

$$t_{ikl_1}+p_{ikl_1}\le t_{ik+1l_2} \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in\{1,\ldots oi-1\},\ \forall l_1,l_2\in M \tag{36}$$

$$t_{i_1k_1l}+p_{i_1k_1l}\le t_{i_2k_2l} \qquad \forall i_1,i_2\in J,\ \forall k_1\in O_{i1},k_2\in O_{i2},\ \forall l\in M \tag{37}$$

$$t_{ikl}\ge 0 \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in O_i\ und\ \forall l\in M \tag{38}$$

$$c_{il}^{prodfix}\ge 0 \qquad \forall i\in J,\ \forall l\in M \tag{39}$$

$$c_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}\ge 0 \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in O_i\ und\ \forall l\in M \tag{40}$$

$$c_{il}^{prodset}\ge 0 \qquad \forall i\in J,\ \forall l\in M \tag{41}$$

$$c_{i}^{prodpen}\ge 0 \qquad \forall i\in J \tag{42}$$

$$a_{ikl}^{prod\,\mathrm{var}}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in O_i\ und\ \forall l\in M \tag{43}$$

$$a_{ikl}^{prodset}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in J,\ \forall k\in O_i\ und\ \forall l\in M \tag{44}$$

$$a_{i}^{prodpen}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in J \tag{45}$$

$$si_t=si_{t-1}+si_t^{+}-si_t^{-} \tag{46}$$

$$\kappa_{\max}^{tstor}\ge si_t\ge 0 \tag{47}$$

$$c_{i}^{tstor}\ge 0 \qquad \forall i\in J \tag{48}$$

$$a_{i}^{tstor}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in J \tag{49}$$

$$\sum_{f\in H}a_{f0}+\sum_{f\in H}a_{0f}=2\nu \tag{50}$$

$$\sum_{f\in H}a_{fe}+\sum_{f\in H}a_{ef}=2 \qquad \forall e\in H \tag{51}$$

$$0\le b_e\le\kappa_{\max}^{transp} \qquad \forall e\in H \tag{51}$$

$$0<d_e\le\kappa_{\max}^{transp} \qquad \forall e\in H \tag{52}$$

$$a_{ef}\in\{0,1\} \qquad \forall (e,f)\in E \tag{53}$$

b_e ganzzahlig	$\forall e \in H$	(54)
$c_{ef} \geq 0$	$\forall (e,f) \in H$	(55)
$c_{T_v}^{transpfix} \geq 0$	$\forall T_v \in T$	(56)
$c_{ef}^{transp\,var} \geq 0$	$\forall (e,f) \in H$	(57)
$c_i^{transppen} \geq 0$	$\forall i \in J$	(58)
$A_{T_v} \in \{0,1\}$	$\forall T_v \in T$	(59)
$B_f \in \{0,1\}$	$\forall f \in H$	(60)
$\sum_{i \in J} A_{T_v}^i \geq 1$	$\forall i \in J$ und $\forall T_v \in T$	(61)
$C_{\max_i}^{prod} \leq t_v^i$	$\forall i \in J$ und $\forall v \in T$	(62)

Bei der integrierten Betrachtungsweise sind zusätzlich zu den bereits oben erläuterten Nebenbedingungen weitere Nebenbedingungen erforderlich. Dies betrifft den Ausdruck (61), mit dessen Hilfe eine Zuordnung von Jobs zu Knoten und Touren erfolgt. Dadurch wird garantiert, dass innerhalb einer Tour nur Knoten angefahren werden, die mindestens einen Job beauftragt haben. Der Ausdruck (62) beschreibt, dass die Startzeit einer Tour nicht vor dem Abschluss der Produktion liegen kann.

Durch die Zusammenführung der beiden Teilprobleme, die jedes für sich bereits NP-schwer sind (vgl. [Brucker, 2007] und [Gudehus, 2010]), und die angegebenen Erweiterungen entsteht das integrierte Planungsproblem. Dieses ist folglich ebenfalls NP-schwer [Geismar et al., 2008]. Das diesem Standardproblem der integrierten Planung zugrunde liegenden Planungsmodell lässt sich mit Hilfe der in Abschnitt 4.1.6 vorgestellten Klassifikation nach Meinecke und Scholz-Reiter (2014a) durch folgendes Tupel charakterisieren, dessen Komponenten aus Gründen der Übersichtlichkeit den jeweiligen Teilproblemen zugeordnet sind.

Produktionsparameter:

$[J, m]$	$[\alpha_1, \alpha_2]$
$[\circ, res, prec, r_j, m_j, p_{ij}, jdd, \odot, pprodfc, pprodvc, ssdc, pentd]$	$[\beta_1, .., \beta_{12}]$

Parameter Zwischenspeicher:

$[lcts, ilst, uspc]$	[TS1, TS2, TS3]

Transportparameter:

$[kn, sdpt, ssrc, unw, sldn]$	[NW1, .., NW5]

$$\left[nspl, \odot, spp, vcd, lctv, iv, sto, \odot, \text{de}, rout, vftc, dvtc, pentd\right] \qquad \left[\text{SP1}, .., \text{SP13}\right]$$

Zielfunktion:

$$\left[\min c^{ipods}\right] \qquad \left[\gamma\right]$$

4.3 Überblick über Lösungsverfahren

Nach bisherigem Stand existiert in der Literatur nur eine Strukturierung der Lösungsverfahren für das IPODS-Problem. Diese Strukturierung wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und veröffentlicht (vgl. [Meinecke und Scholz-Reiter, 2013]). Die Autoren untersuchten dabei unabhängig vom jeweils unterstellten Planungsmodell existierende Lösungsverfahren hinsichtlich der gewählten Vorgehensweise. Auf Grund der Vielzahl der dafür untersuchten Quellen wird an dieser Stelle nur das Ergebnis dieser Untersuchungen diskutiert.

Grundsätzlich lassen sich die Lösungsverfahren der hier betrachteten integrierten Planung in Analogie zu den Lösungsverfahren der Produktions- und Transportplanung in exakte Verfahren und Heuristiken unterscheiden. Exakte Verfahren werden nicht weiter betrachtet, da diese auf Grund der hohen Komplexität der Teilprobleme und folglich auch der hohen Komplexität des integrierten Planungsproblems nur für sehr kleine Probleminstanzen angewendet werden können. Innerhalb der Heuristiken lassen sich wiederum zwei grundlegend unterschiedliche Lösungsansätze differenzieren. Dabei handelt es sich einerseits um Lösungsverfahren, die mit Hilfe der Dekomposition das integrierte Planungsproblem in die beiden Teilprobleme zerlegen, diese separat voneinander lösen und anschließend die Lösungen der Teilprobleme durch eine Integration wieder zu einer Gesamtlösung zusammenführen. Diese Lösungsverfahren arbeiten auf Grund der Problemgröße mit kleineren Teillösungen. Dabei wird die Zerlegung entsprechend der einzelnen Planungsprobleme durchgeführt [Li et al., 2005]. Andererseits gibt es weitere Lösungsverfahren, die beispielsweise auf verhandlungsbasierten Ansätzen beruhen oder agentenbasierte Verfahren einsetzen (vgl. [Holmgren, 2010]). Diese weiteren Verfahren werden im Folgenden nicht betrachtet. Die Abbildung 24 gibt einen Überblick über eine mögliche Strukturierung der Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems nach Meinecke und Scholz-Reiter (2013). Ausgehend von diesem Überblick werden im Folgenden die Näherungsverfahren detaillierter strukturiert, die eine Dekomposition und Integration zur Lösungsfindung verwenden.

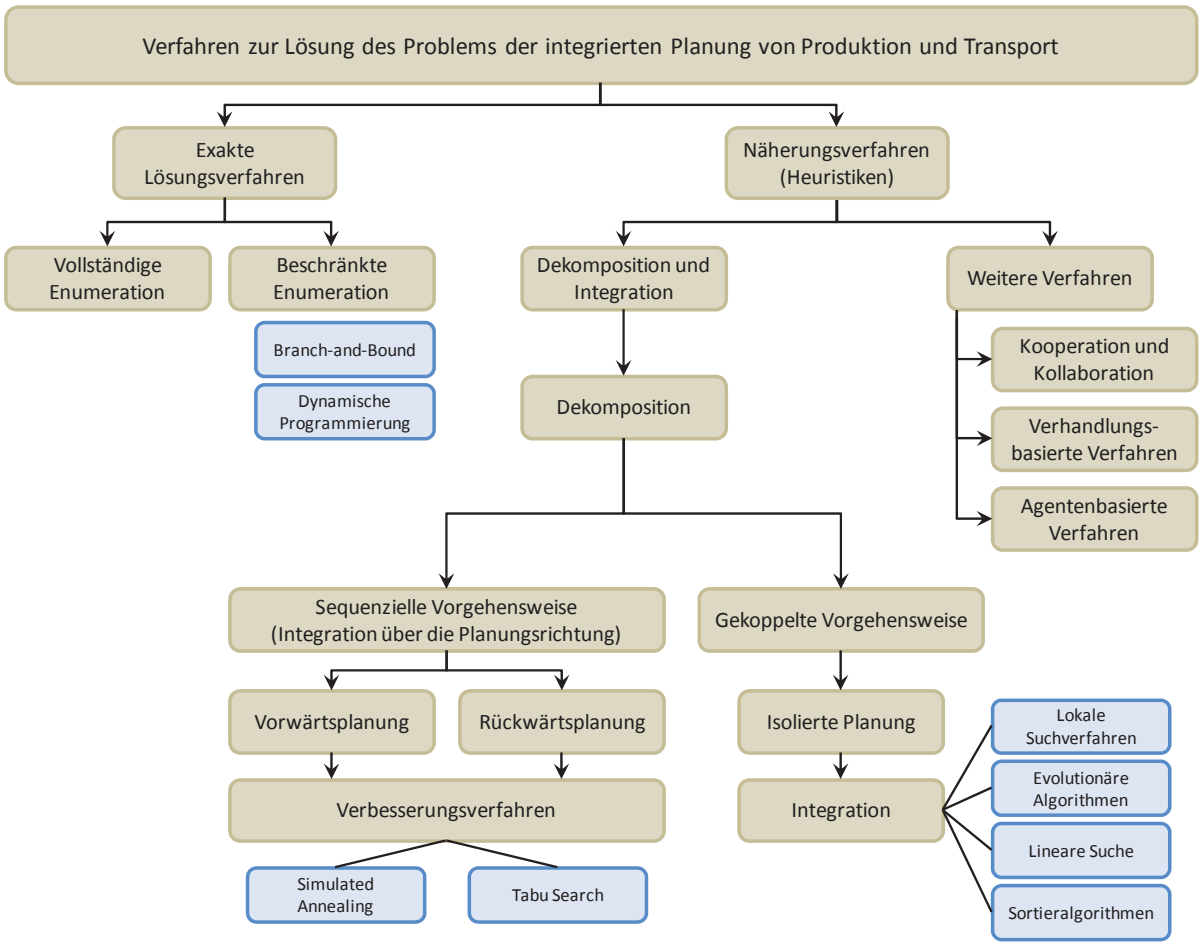


Abbildung 24: Strukturierung von Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems

Eine Mehrzahl existierender Planungsansätze auf operativer Ebene nutzen die Dekomposition und Integration, um das Gesamtproblem zunächst in kleinere Teilprobleme zu zerlegen und die einzelnen Ergebnisse anschließend wieder zusammenzuführen. Das bedeutet, dass das integrierte Problem zunächst wieder in die Teilprobleme Produktionsplanung und Transportplanung zerlegt wird. Die erfolgreiche Anwendung der Dekomposition zur Lösung komplexer logistischer Problemstellungen wurde bereits in den Anfängen der integrierten Planung belegt (vgl. [Sharp et al., 1970], [Federgruen und Zipkin, 1984], [Cohen und Lee, 1988]). Auch viele aktuelle Lösungsverfahren greifen auf die Methode der Dekomposition bei der Entwicklung von Heuristiken zurück [Fumero und Vercellis, 1999]. Aufbauend auf dieser Dekomposition existieren zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Lösung des integrierten Planungsproblems.

Zum einen kann eine Integration über die Planungsrichtung erfolgen. Dies bedeutet, dass diese Lösungsverfahren eine sequenzielle Vorgehensweise verfolgen, bei der zunächst die Produktionsplanung und anschließend die Transportplanung (entspricht dem Push-Prinzip) bzw. zuerst die Transportplanung und im Anschluss die Produktionsplanung (entspricht dem Pull-Prinzip) betrachtet wird (vgl. [Gleißner und Femerling, 2008] und [Schönsleben, 2011]). Das zuerst betrachtete Planungsproblem determiniert somit einen initialen Plan, der als unveränderliche Eingangsgröße für das nachfolgend betrachtete Planungsproblem dient. Bei den meisten Lösungsverfahrens endet damit die Integration. Diese sequenzielle Vorgehensweise wird vielfach bereits als integrierte Planung aufgefasst, da die Ergebnisse des einen Teilproblems als Restriktionen

bei der Planung des anderen Teilproblems berücksichtigt werden. Diese Auffassung wird an dieser Stelle aus verschiedenen Gründen nicht geteilt. Zum ersten handelt es sich bei dieser sequenziellen Betrachtungsweise aus formaler Sicht um eine einseitige Berücksichtigung von Anforderungen und Restriktionen, da im Planungsprozess ausschließlich das nachgelagert betrachtete Teilproblem Informationen des vorgelagerten Teilproblems beachten muss. Von einer wirklichen Integration hingegen wird gesprochen, wenn beide Teilprobleme Anforderungen und Restriktionen des jeweils anderen Teilproblems berücksichtigen [Chen und Hall, 2007]. Zum zweiten folgt aus dieser formalen Sicht, dass es sich in der Praxis bei den planenden Akteuren in aller Regel nicht um gleichberechtigte Partner handelt. Der Problemeigner des vorgelagerten Teilproblems entwirft seine eigene Planung so, dass seine Planungsziele so gut wie möglich erreicht werden und damit sein Gewinn maximiert wird. Das vorgelagerte Teilproblem dominiert somit das nachgelagerte Teilproblem vollständig. Eine übergeordnete Betrachtung im Sinne einer Optimierung des gesamten Betrachtungsbereichs findet auf diese Weise nicht statt. In der Folge kann auch für diesen gesamten Betrachtungsbereich lediglich ein suboptimales Planungsergebnis erzielt werden. Diese Tatsache stellt den dritten Grund für die Ablehnung der sequenziellen Betrachtungsweise als integrierte Planung dar.

Nur sehr wenige Lösungsverfahren wenden nach Abschluss der Push- bzw. Pull-Planung Verbesserungsverfahren an, um das bis dahin vorliegende Gesamtplanungsergebnis weiter zu verbessern. Bei dieser Erweiterung der sequenziellen Betrachtungsweise wird in der Nachbarschaft der erzeugten Lösungen nach weiteren Optimierungen gesucht. Beispielsweise werden mit Hilfe von lokalen Suchverfahren Verbesserungen des integrierten Planungsergebnisses identifiziert und entsprechende Vertauschungen durchgeführt. Diese Optimierungen zielen allerdings nur auf die Verbesserung des erzeugten Ergebnisses, das auf Basis der Planung über eine Integrationsrichtung entwickelt wurde. Dennoch können diese Vertauschungen als weitere Integration aufgefasst werden, da auf diesem Weg das ursprünglich sehr gute Planungsergebnis aus der Sicht des vorgelagerten Teilproblems zugunsten einer verbesserten Gesamtlösung verändert wird. Die auf diese Weise erreichte Integration wird durch die Größe der Nachbarschaft begrenzt. Eine darüber hinausgehende Integration findet in der Regel nicht statt.

Die Erweiterung der sequenziellen Vorgehensweise durch die Anwendung von Verbesserungsverfahren führt tendenziell zu besseren Planungsergebnissen im Vergleich mit der ausschließlich sequenziellen Betrachtungsweise. Dennoch ist auf Grund der beschriebenen Vorgehensweise nicht sichergestellt, dass nach Abschluss des sequenziellen Planungsschritts Verbesserungen identifiziert und Vertauschungen durchgeführt werden können. Weiterhin ist das mögliche Optimierungspotenzial abhängig von der Größe des Suchraums. Bei einem großen Suchraum erhöht sich das mögliche Optimierungspotenzial und damit auch die benötigte Lösungsdauer. Weiterhin gilt, dass sich die Lösung des integrierten Planungsergebnisses mit kleiner werdendem Suchraum der Lösung der sequenziellen Betrachtungsweise annähert. Dennoch wurde erkannt, dass diese Vorgehensweise gegenüber der ausschließlich sequenziellen Betrachtungsweise bessere Lösungen erzeugt und entsprechendes Optimierungspotenzial bietet.

Auf Grund der in vielen Unternehmen existierenden Kostenverteilung zwischen Produktion und Transport weist die Mehrzahl der bisher entwickelten Lösungsverfahren eine starke Produktionsorientierung auf, was mit einer sequenziellen Betrachtungsweise nach dem Push-Prinzip einhergeht. Transportorientierte Planungsansätze wurden erst in den letzten Jahren entwickelt und untersucht (vgl. [Geismar et al., 2008], [Scholz-Reiter et al., 2009], [Hermes et al., 2009], [Scholz-Reiter et al., 2010] und [Strack, 2012]). Eine Integration der beiden Planungsprobleme, so wie sie in dieser Arbeit verstanden wird, ist bei der Push- bzw. Pull-Planung auch nach der Anwendung von

Verbesserungsverfahren nur in geringem Maße vorhanden. Methodisch wird zur Lösung der Teilprobleme bei beiden Formen der sequenziellen Vorgehensweise auf bekannte Verfahren aus der Produktionsplanung sowie aus der Transportplanung zurückgegriffen, wie sie oben bereits erläutert wurden.

Neben der sequenziellen Vorgehensweise kann die Integration nach Meinecke und Scholz-Reiter (2013) auch mit Hilfe der gekoppelten Vorgehensweise erfolgen, die nach Fumero und Vercellis (1999) auch als synchronisierte Vorgehensweise bezeichnet wird. Diese entspricht einer konsequenten Umsetzung des Integrationsgedankens und erfordert die Berücksichtigung von Anforderungen aus beiden Teilbereichen bei der Planung des jeweils anderen Bereichs.

Nach der Dekomposition des Gesamtproblems in die einzelnen Teilprobleme werden diese im Gegensatz zur sequenziellen Vorgehensweise zunächst isoliert voneinander mit Hilfe bekannter Methoden aus der Produktions- bzw. Transportplanung gelöst. Die Teilergebnisse bestehen folglich aus einem Produktionsplan und einem Transportplan und erfüllen die Planungsziele des jeweiligen Teilproblems in hohem Maße. Anschließend werden die beiden Teilergebnisse zu einem Gesamtplanungsergebnis zusammengeführt. Dieses erfüllt das übergeordnete Zielkriterium zu einem gewissen Maß. Nach der Zusammenführung der beiden jeweils sehr guten Teilergebnisse zu einem Gesamtplanungsergebnis erfolgt die Integration durch die gegenseitige Abstimmung der beiden Teilergebnisse mit dem Ziel der Verbesserung des bisher erzielten Gesamtplanungsergebnisses. Diese Verbesserung des Gesamtplanungsergebnisses erfolgt durch die iterative Modifikation der beiden Teilergebnisse mit dem Ziel der Verbesserung hinsichtlich der Ausprägung des übergeordneten Zielkriteriums.

Zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen und zur iterativen Modifikation der Teilergebnisse werden beispielsweise lokale Suchverfahren oder Sortieralgorithmen genutzt [Chen und Vairaktarakis, 2005]. Weiterhin kommt das Verfahren der linearen Suche zum Einsatz, das die erzeugten Transport- bzw. Produktionspläne hinsichtlich zuvor definierter Kriterien auf Verbesserungsmöglichkeiten überprüft [Chandra und Fisher, 1994]. Nach jeder durchgeführten Veränderung werden diese neuen Teilergebnisse hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das übergeordnete Gesamtkriterium beurteilt. Die Gesamtkosten entsprechen in der Regel diesem übergeordneten Gesamtkriterium. Bei einer positiven Auswirkung auf das Zielkriterium wird das dadurch entstandene Gesamtergebnis als neues bestes Ergebnis markiert. Bei einer negativen Auswirkung wird diese Veränderung verworfen und die bisherigen Teilergebnisse entsprechen weiterhin dem Gesamtplanungsergebnis. Verfahren, die keine Verschlechterung des Gesamtergebnisses zulassen, verfolgen somit eine Greedy-Strategie. Dabei besteht die Gefahr, dass die beste Gesamtlösung lediglich ein lokales Optimum darstellt, das nicht wieder verlassen werden kann. Im Gegensatz dazu ist es beim Threshold Accepting (Verschlechterung innerhalb der definierten Grenzen eines Schwellwertes) prinzipiell möglich, ein lokales Optimum wieder zu verlassen, um ein insgesamt besseres Ergebnis zu erzielen. Die Lösungsverfahren, die nach diesen beschriebenen Vorgehensweisen arbeiten, weisen einen von der Größe des Suchraum bzw. von dem Schwellwert abhängigen Integrationsgrad auf. Dennoch weisen diese Lösungsverfahren tendenziell einen höheren Integrationsgrad auf als die Planungsansätze, die ausschließlich nach der sequenziellen Vorgehensweise arbeiten.

Im Rahmen der gekoppelten Vorgehensweise kommen auch evolutionäre Algorithmen zum Einsatz, deren grundlegendes Prinzip in dieser Arbeit bereits beschrieben wurde. Generell können

evolutionäre Algorithmen entweder auf die zulässigen Lösungen des Gesamtproblems oder auf die Teillösungen nach der Durchführung der Dekomposition angewendet werden [Ullrich, 2013].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Mehrzahl der integrierten Lösungsverfahren nach der sequenziellen Vorgehensweise arbeiten und damit eine Integration über die Planungsrichtung anstreben. Die wenigen Lösungsverfahren, die nach der gekoppelten Vorgehensweise arbeiten, führen eine isolierte Planung der beiden Teilprobleme durch. Die anschließende Integration erfolgt entweder mittels lokaler Verbesserungsverfahren oder unter Verwendung eines globalen Optimierungsansatzes, der die gesamte Lösungsmenge betrachtet. Die Anwendung der gekoppelten Vorgehensweise erlaubt eine höhere Integration der beiden Teilergebnisse und daher ein verbessertes Gesamtplanungsergebnis, weshalb das in dieser Arbeit zu entwickelnde Lösungsverfahren auch nach dieser gekoppelten Vorgehensweise entworfen wird. Im nachfolgenden Abschnitt werden einige ausgewählte Lösungsverfahren detailliert betrachtet.

4.4 Ausgewählte Lösungsverfahren des IPODS

In diesem Abschnitt werden exemplarisch einige Lösungsverfahren vorgestellt, die eine Dekomposition und Integration zur Lösung des integrierten Planungsproblems nutzen. Zunächst wird zum Vergleich jeweils ein Lösungsverfahren vorgestellt, dass nach dem Push- bzw. dem Pull-Prinzip arbeitet. Der Fokus der Betrachtungen liegt jedoch auf den Lösungsverfahren, die entsprechend der gekoppelten Vorgehensweise arbeiten und die deshalb den Entwicklungsstand in diesem Bereich repräsentieren. Bei der Vorstellung wird zunächst auf einige Charakteristika des zugrunde liegenden Modells eingegangen. Anschließend wird auf die verwendeten Methoden bzw. auf die allgemeine Vorgehensweise des jeweilige Lösungsverfahrens eingegangen. Sofern es möglich ist, wird eine kurze Einschätzung der Leistungsfähigkeit bzw. der Übertragbarkeit auf abgewandelte Problemstellungen gegeben. Abschließend werden die mit diesem Verfahren erzielten Ergebnisse dargelegt, wenn diese Angaben bei den jeweiligen Autoren verfügbar sind. Durch diese einheitliche Strukturierung wird ein vergleichender Überblick der Lösungsverfahren ermöglicht.

4.4.1 Integration über die Planungsrichtung: Pull-Prinzip

Das Modell, das bei der Entwicklung eines nach dem Pull-Prinzip arbeitenden Lösungsverfahrens nach Scholz-Reiter et al. (2009) unterstellt wird, entspricht einem Job-Shop-Szenario mit drei Werkstätten mit jeweils drei Maschinen und ist an ein reales Produktionsszenario angelehnt. Vor den Werkstätten befinden sich entsprechende Pufferflächen und nach Abschluss der Produktion unterschiedlicher Produkte werden diese in einem Zwischenspeicher bis zum Beginn des Transports gepuffert. Eine Anzahl von Transportfahrzeugen befördert die Produkte auftragsbezogen zu den Kunden, die sich über ganz Deutschland verteilen. Die Produktionsstätte befindet sich dabei in einer Randlage dieses Distributionsnetzes.

Das nach dem Pull-Prinzip arbeitende Lösungsverfahren beginnt nach der Dekomposition des Gesamtproblems mit der Betrachtung des Teilproblems der Transportplanung. Ausgangspunkt für die Bildung einer Tour ist der Auftrag mit dem frühesten Liefertermin. Anschließend werden die Aufträge der Tour hinzugefügt, die in der Umgebung des dringendsten Kunden auszuliefern sind und bei deren Hinzunahme zu dieser Tour die Kapazität der Transportmittel nicht überschritten wird. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Aufträge Touren zugeordnet sind. Diese Tourenplanung dient als Basis für die Produktionsplanung , deren Ziel es in dieser Pull-Planung ist, das die zu einer Tour gehörenden Aufträge die Bearbeitung rechtzeitig und ungefähr zur gleichen Zeit abschließen.

Mit Hilfe der Rückwärtsterminierung kann auf diese Weise ein frühester und ein spätest möglicher Bearbeitungsbeginn festgelegt werden.

Die Ergebnisse einer Simulationsstudie haben gezeigt, dass im Vergleich zu einem nach dem Push-Prinzip arbeitenden Lösungsverfahren signifikante Verbesserungen erzielt werden konnten. So konnte der durchschnittliche Ladefaktor der Transportfahrzeuge um 20 % erhöht, die durchschnittlichen Anzahl der durchzuführenden LKW-Touren um 15 % und die Fläche des Zwischenspeichers um 44 % reduziert werden. (vgl. [Scholz-Reiter et al., 2010] und [Scholz-Reiter und Meinecke, 2011])

4.4.2 Integration über die Planungsrichtung: Push-Prinzip

Dem Lösungsverfahren von Chandra und Fisher (1994) liegt ein Modell zugrunde, dass aus einer Produktionsstätte und einer Anzahl von Fahrzeugen besteht, welche die verschiedenen produzierten Güter zu unterschiedlichen Kunden transportieren. Da die Produktionsstätte nicht weiter detailliert wird, ergibt sich daraus für das Teilproblem Produktion ein 1-Maschinen Problem. Zur Entkopplung der Produktion vom Transport existiert ein Fertigwarenlager an der Produktionsstätte, das die Produkte bis zum Beginn der Distribution kurzfristig aufnimmt.

Die Autoren verwenden die Dekomposition, um das Gesamtproblem in zwei kleinere Teilprobleme zu zerlegen. Zur Lösung des Produktionsplanungsproblems wird ein branch and bound Verfahren nach Singhal et al. (1989) verwendet. Darauf aufbauend wird das Teilproblem der Transportplanung unter Verwendung des Sweep-Verfahrens nach Gillett und Miller (1974) in Kombination mit weiteren Verfahren gelöst (vgl. [Chandra und Fisher, 1994]). Darüber hinaus kommt das ebenfalls in dieser Arbeit verwendete 3-opt-Verfahren nach Lin und Kernighan (1973) als Verbesserungsverfahren zum Einsatz.

Im Ergebnis zeigt sich, dass eine Optimierung nur über die Konsolidierung von Ladungen erfolgen kann, da der Produktionsplan als feste und unveränderliche Eingangsgröße angesehen wird. Eine Integration findet nur in der Transportplanung statt, die das Ergebnis der Produktionsplanung als Eingangsgröße verwendet.

4.4.3 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chandra und Fisher (1994)

Chandra und Fisher (1994) greifen bei der Entwicklung eines Lösungsverfahrens auf das gleiche Modell zurück, dass von ihnen bereits im vorherigen Abschnitt verwendet wurde (siehe Abschnitt 4.4.2). Das dort entwickelte Lösungsverfahren dient als Vergleichsverfahren bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit des nachfolgend beschriebenen Lösungsverfahrens.

Zur Lösung des integrierten Problems greifen Chandra und Fisher (1994) auf die Dekomposition zurück und zerlegen das Gesamtproblem in zwei Teilprobleme, die sie mit Hilfe von bekannten Verfahren aus der Produktions- bzw. Transportplanung zunächst separat lösen (siehe Abschnitt 4.4.2). Anschließend wird nach Möglichkeiten gesucht, um die Gesamtkosten durch eine Veränderung des Produktions-bzw. Transportplans zu reduzieren. Dazu werden die Ergebnisse der einzelnen Teilprobleme mit Hilfe eines Tauschverfahrens modifiziert, um durch die Zusammenfassung von Transporten zu einem Kunden zu erreichen. Diese Vertauschungen werden hinsichtlich der Kostensituation bewertet und bei einer Verbesserung dieser als neues bestes Ergebnis übernommen. Ausgehend von diesem neuen Ergebnis wird das Verfahren so lange wiederholt, bis keine weitere Verbesserung mehr erreicht werden kann. Damit ist diese Vorgehensweise als Greedy-Verfahren einzustufen.

Als Ergebnis ihrer Untersuchungen formulieren Chandra und Fisher (1994), dass durch den Einsatz der gekoppelten Vorgehensweise im Vergleich zur Integration über die Planungsrichtung eine Reduzierung der operativen Kosten zwischen 3 und 20 % erreicht werden konnte. Weiterhin stellen die Autoren fest, dass dieser Effekt mit wachsendem Planungshorizont und mit einer größer werdenden Kunden- und Produktanzahl sowie mit steigender Transportkapazität zunimmt. Darüber hinaus weisen sie auf den Zusammenhang hin, dass dieser Kosteneffekt bei relativ steigenden Distributionskosten im Verhältnis zu den Produktionskosten auftritt. Dabei bleibt festzuhalten, dass dieser Zusammenhang abhängig von der Kostenverteilung zwischen Produktion und Distribution im gewählten Szenario ist.

4.4.4 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Fumero und Vercellis (1999)

Ein 1-Maschinen Modell, auf dem eine Anzahl unterschiedlicher Produkte gefertigt und bei dem Rüstvorgänge berücksichtigt werden, bildet das Produktionsszenario für das von Fumero und Vercellis (1999) vorgestellte Lösungsverfahren. Darüber hinaus wird unterstellt, dass eine Anzahl von identischen Transportfahrzeugen mit beschränkter Kapazität den Transport der Produkte zum Kunden durchführt. Zwischenspeicher, die sich sowohl an der Produktionsstätte als auch bei den Kunden befinden, nehmen die Produkte für einen begrenzten Zeitraum bis zur Verladung bzw. bis zum Verbrauch durch die Kunden auf.

Das entwickelte Lösungsverfahren zielt darauf ab, die Gesamtsumme aus Rüst-, Lagerhaltungs-, und Transportkosten zu minimieren. Ausgehend von einer optimalen Lösung für das Teilproblem der Produktionsplanung wird unter Nutzung der nearest neighbour Heuristik und der Lagrange Relaxation ein Transportplan entwickelt. Dieser erlaubt das mehrfache Anfahren eines Kunden durch verschiedene Fahrzeuge, um die Nachfrage des jeweiligen Kunden zu bedienen. Durch die Modifikation des Transportplans mit Hilfe eines Tauschverfahrens werden Alternativen erzeugt, die hinsichtlich der entstandenen Kosten bewertet und mit dem bisher besten Transportplan verglichen werden. Sollte sich bei dieser Überprüfung keine Verbesserung ergeben, ist auch eine Modifikation des Produktionsplans möglich, die ebenfalls mit Hilfe eines Tauschverfahrens durchgeführt wird.

Der Vergleich zwischen dem vorgestellten Verfahren der gekoppelten Vorgehensweise und einer Integration über die Planungsrichtung ergibt, dass sich ein Vorteil hinsichtlich der Gesamtkosten zwischen 8 und 12 % für die gekoppelte Vorgehensweise ergibt. Darüber hinaus resümieren die Autoren, dass dieser um so größer ist, je größer der Unterschied zwischen fixen und variablen Transportkosten sowie zwischen zentralen und lokalen Lagerbeständen ist.

4.4.5 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chang und Lee (2004)

Die Autoren Chang und Lee (2004) unterstellen bei dem von ihnen entwickelten Lösungsverfahren ein 2-Maschinen Flow-Shop Problem, bei dem beide Maschinen nacheinander durchlaufen werden. Das Besondere an diesem unterstellten Modell ist die Tatsache, dass die Autoren lediglich die erste Maschine zur Produktion verwenden. Der Transport von der Produktionsstätte zum Kunden wird durch ein Fahrzeug durchgeführt, dass als zweite Maschine angesehen wird. Diese Maschine wird von den Jobs für die Transport belegt und nach der Rückkehr des Fahrzeugs wieder freigegeben.

Zur Lösung dieses Problems wurde eine Heuristik entwickelt, die sich in fünf Schritte untergliedert. Die Basis des Verfahrens bildet eine Zuordnung aller Kunden zu einer von zwei Regionen, in denen Kunden zusammengefasst werden. Im weiteren werden die Zentren einer jeden Kundenregion als Transportziel verstanden, sodass sich daraus ein vereinfachtes Transportszenario mit insgesamt zwei

Transportzielen ableitet. Die Transportzeit zum ersten Transportziel ist dabei nicht größer als die Transportzeit zum zweiten Transportziel. Für jedes der beiden Transportziele werden die einzelnen Aufträge zu Batches zusammengefasst, wobei die Gesamtgröße eines Batches der Transportkapazität eines Fahrzeuges entspricht. Die Bearbeitungsreihenfolge der Batches auf der Produktionsmaschine wird mit Hilfe der Johnson Regel bestimmt. Jobs innerhalb eines Batches können in beliebiger Reihenfolge und ohne Leerlaufzeit bearbeitet werden.

Dieses Lösungsverfahren wurde speziell für den Fall der zwei Kundenregionen entwickelt. Eine Anwendung der Heuristik auf Szenarien mit mehreren Transportzielen ist nicht möglich, ohne Änderungen an der prinzipiellen Vorgehensweise vorzunehmen. Eine Integration findet nur im Zuge der Abstimmung der Transportkapazitäten mit der Größe der Batches statt.

4.4.6 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Li et al. (2005a)

Das Modell von Li et al. (2005a) umfasst wie das zuvor beschriebene Modell von Chang und Lee (2004) ebenfalls zwei Kunden und ein Fahrzeug. Es wird unterstellt, dass die Aufträge ohne Wartezeit bearbeitet werden und ein Auftrag, dessen Bearbeitung vor der Bearbeitung eines anderen Auftrags beginnt, die Produktion spätestens mit diesem späteren Auftrag verlässt. Wenn das Fahrzeug nach dem Transport der Güter zu einem Kunden zur Fabrik zurückgekehrt, kann das Fahrzeug entweder den nächsten Batch unverzüglich ausliefern oder es wartet bis der Fertigstellungszeitpunkt des nächsten Jobs erreicht ist.

Auf Basis der dynamischen Programmierung entwickelten die Autoren einen exakten Algorithmus und greifen dabei auf die Methode der Dekomposition des Planungsproblems in mehrere Teilprobleme zurück. Die grundlegende Idee dieses exakten Algorithmus ist die Überlegung, dass es für das eine unterstellte Fahrzeug nur eine begrenzte Anzahl an möglichen Abfahrtszeitpunkten geben kann. Davon ausgehend werden die möglichen Ankunftszeiten und damit die mögliche Gesamtverspätung für jeden der errechneten Abfahrtszeitpunkte und für alle Auftragskombinationen ermittelt. Als Ergebnis dieser vollständigen Enumeration wählt der Algorithmus die Lösung mit der geringsten Gesamtverspätung aus.

Das entwickelte Lösungsverfahren lässt kaum eine Abweichung von den unterstellten Modellannahmen zu. Eine Erweiterung des Modells würde die Komplexität und damit die Zeit für die Lösungsfindung deutlich erhöhen.

4.4.7 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Chen und Vairaktarakis (2005)

Das von Chen und Vairaktarakis (2005) entwickelte exakte Lösungsverfahren basiert auf einem Modell, bei dem alle Aufträge ohne Wartezeit fortlaufend auf einer Maschine bearbeitet werden, die mit einer Lieferung zu den Kunden transportiert werden. Bei diesem Lösungsverfahren werden die beiden Zielkriterien Transportkosten und maximale Durchlaufzeit als eine konvexe Kombination simultan in einer Wertfunktion betrachtet. Dabei wird mit Hilfe eines Gewichtungsfaktor die relative Präferenz des Entscheidungsträgers hinsichtlich der Optimierung der Transportkosten oder maximalen Durchlaufzeit ausgedrückt.

Der entwickelte Verfahren nutzt wie das Verfahren von Li et al. (2005a) die dynamische Programmierung, um mittels einer vollständigen Enumeration einen optimalen Plan zu finden. Dazu werden alle Aufträge, die zum selben Kunden gehören, in einer SPT-Reihenfolge (shortest processing time first = kürzeste Bearbeitungszeit zuerst) sortiert. Anschließend werden für jede Auftragskombination die Durchlaufzeit und für jede mögliche Route die entsprechenden

Transportkosten ermittelt. Der optimale Plan entspricht der Kombination der beiden Teilpläne, bei denen die gewichtete Zielfunktion minimal ist.

Das entwickelte Lösungsverfahren ist starr und lässt keine Änderung der unterstellten Modellannahmen zu. Beispielsweise ist eine Beschränkung der Fahrzeuganzahl oder die Einführung variabler Auftragsgrößen nicht ohne Änderung der Wertefunktion möglich, da andernfalls unzulässige Pläne erzeugt werden können. Weiterhin würde eine Erweiterung des Modells die Komplexität und damit die Zeit für die Lösungsfindung deutlich erhöhen.

4.4.8 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Li und Vairaktarakis (2007)

Li und Vairaktarikis (2007) unterstellen bei der Entwicklung ihres Lösungsverfahrens ein Modell mit zwei parallelen Maschinen in einer Produktionsstätte. Jeder Auftrag besteht aus zwei tasks, wobei task 1 ausschließlich auf Maschine 1 und task 2 ausschließlich auf Maschine 2 bearbeitet wird. Damit entspricht diese bundling Anordnung einer open-shop Fertigungsorganisation bzw. einer Werkstattfertigung mit dem Unterschied, dass hier nur eine Maschine pro Werkstatt zur Verfügung steht. Ein Auftrag hat die Produktion abgeschlossen, wenn beide tasks vollständig ausgeführt wurden. Nach Abschluss der Produktion können Aufträge konsolidiert werden, wenn sie für einen Kunden bestimmt sind. Für den anschließenden Direkttransport zum jeweiligen Kunden steht eine unbegrenzte Anzahl von Transportfahrzeugen zur Verfügung, wobei für jedes genutzte Fahrzeug Bereitstellungskosten entstehen.
Das Ziel besteht in der Minimierung der gewichteten Gesamttransportkosten sowie der Gesamtdurchlaufzeit. Zur Lösung dieses Problems wurde ein mathematisches Modell des unterstellten Problems formuliert. Die vorhandenen Aufträge werden nach der Dekomposition in die Teilprobleme zunächst separat für jeden einzelnen Kunden gruppiert und anschließend hinsichtlich ihrer Bearbeitungszeiten sortiert. Darauf aufbauend wird mit Hilfe der dynamischen Programmierung für jeden einzelnen Kunden ein optimaler Plan ermittelt.
Das entwickelte Lösungsverfahren unterteilt die Auftragsmenge entsprechend der jeweiligen Kunden und beliefert diese direkt. Dies führt einerseits zu sehr kleinen Problemgrößen für die Produktionsplanung und erfordert andererseits keinerlei Routenplanung im herkömmlichen Sinn. Die unbegrenzten Anzahl von Transportfahrzeugen ändert die Natur des Transportplanungsproblems in Richtung eines Trade-offs zwischen Bereitstellungskosten für jedes genutzte Transportfahrzeug und Strafzahlungen für verspätete bzw. Lagerhaltungskosten im Falle verfrühter Lieferungen. Die Integration besteht nur darin, dass bei der Produktionsplanung alle Aufträge für einen Kunden in einer Gruppe zusammengefasst und diese nur mit geringem zeitlichen Abstand bearbeitet werden.

4.4.9 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Boudia und Prins (2009)

Das von Boudia und Prins (2009) vorgestellte Lösungsverfahren wurde auf Basis eines Modells entwickelt, dass durch eine Produktionsstätte gekennzeichnet ist, die ein Produkt herstellt. Damit reduziert sich das Teilproblem der Produktion auf ein 1-Maschinen und 1-Produkt Problem und damit auf die Entscheidung, ob und wie viel in einer Planungsperiode produziert werden soll. Das Produkt wird durch eine begrenzte Anzahl identischer Transportfahrzeugen mit beschränkter Kapazität zu einer Menge von Kunden mit jeweils unterschiedlicher Nachfrage transportiert. Die Produktionsstätte verfügt über ein Zwischenspeicher, der fertig produzierte Güter für die Zeit bis zur Verladung auf die Transportfahrzeuge aufnimmt. In dem Modell werden Strafkosten für die verspätete Lieferung sowie Rüstkosten für den Fall betrachtet, dass eine Produktion in einer Periode stattfindet.

Der entwickelte memetische Algorithmus umfasst zunächst die Dekomposition in die beiden Teilprobleme, die separat gelöst werden. Diese Startlösungen werden anschließend mit Hilfe einer lokalen Suche verbessert und stellen danach die Ausgangspopulation dar, von denen die beiden besten Startlösungen mit Hilfe einer Bewertungsfunktion identifiziert werden. Aus diesen Individuen werden neue Individuen einer neuen Generation erzeugt, die sich daraus ergebende Gesamtlösungen wiederum mit Hilfe eines lokalen Suchverfahrens verbessert und erneut bewertet. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Lösungsverfahren, die nach der gekoppelten Vorgehensweise arbeiten, wird bei diesem Lösungsansatz die gesamte Lösungsmenge einer erzeugten Generation untersucht und nicht nur die Nachbarschaft der erhaltenen Startlösung.

Die gewählte Vorgehensweise hat einerseits eine erheblich gesteigerte Rechenzeit aber andererseits ein verbessertes Gesamtplanungsergebnis zur Folge. Durch die Anwendung des evolutionären Algorithmus findet mit der fortschreitenden Bildung neuer Generationen eine zunehmende Integration der Teilprobleme statt. Der Vergleich mit einem Verfahren, bei dem eine Integration über die Planungsrichtung stattfindet, hat ergeben, dass durch den Einsatz des memetischen Algorithmus Verbesserungen hinsichtlich des Zielkriteriums von mehr als 23 % erreichbar sind.

4.4.10 Gekoppelte Vorgehensweise: Verfahren nach Ullrich (2013)

Ein Modell, dass aus zwei parallel arbeitenden Maschinen und zwei Transportfahrzeugen mit begrenzter Kapazität besteht, bildet die Basis für den von Ullrich (2013) entwickelten genetischen Algorithmus. Die Produkte werden von diesen Fahrzeugen zu den Kunden transportiert, die sich im Umkreis der Produktionsstätte befinden. Zur Erzeugung verschiedener Testinstanzen werden nicht nur die Prozesszeiten sondern auch die Entfernungsmatrix, die Rüstzeiten sowie weitere Parameter mit Hilfe einer Zufallsgenerators erzeugt. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Modellen, werden hier auch Zeitfenster bei der Anlieferung berücksichtigt. Allerdings ergeben sich diese einerseits aus der minimalen technologisch bedingten Bearbeitungsdauer und aus einem daraus berechneten spätest möglichen Liefertermin andererseits. Damit entspricht dieses Zeitfenster einer konventionellen Betrachtung, bei der einerseits die untere zeitliche Schranke nicht verletzt werden kann, da andernfalls das Produkt noch nicht fertig produziert wurde und bei der andererseits Verspätungen nicht erlaubt sind und folglich bestraft werden.

Zur Lösung des Problems wurde ein genetischer Algorithmus entwickelt, der das Gesamtproblem betrachtet und ohne die Dekomposition in Teilprobleme auskommt. Eine Menge von zulässigen Lösungen für das Gesamtproblem (Individuen) stellt die Ausgangspopulation dar, die mit Hilfe einer Bewertungsfunktion hinsichtlich ihrer Fitness (Erfüllungsgrad der Zielkriterien) beurteilt wird. Wenn ein Individuum einer Generation eine bessere Bewertung erhält als das bisher beste Individuum bildet dies den Ausgangspunkt zur Bildung neuer Individuen in der nachfolgenden Generation durch Kreuzung, Mutation und Reproduktion. Das Lösungsverfahren bricht ab, wenn in einer Generation keine Individuen mehr erzeugt werden können, die eine bessere Fitness aufweisen als das bisher beste Individuum.

Die Leistungsfähigkeit des genetischen Algorithmus wurde anhand zweier ebenfalls von Ullrich (2013) entwickelten Vergleichsverfahren erbracht, von denen jeweils eins nach dem Push- bzw. nach dem Pull-Prinzip arbeitet. In den durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Lösungsverfahren, die eine Integration über die Planungsrichtung verfolgen eine mittlere Abweichung vom Optimum zwischen 13 und 18 % erreichen. Im Gegensatz dazu erreichen die Lösungen, die mittels des genetischen Algorithmus entwickelt werden eine mittlere Abweichung von etwa 3 % vom Optimum. Durch die Anwendung eines genetischen Algorithmus, der auf der

Gesamtlösungsmenge arbeitet und lediglich eine Ausgangspopulation erfordert, ist eine Übertragung auf abgewandelte Problemstellungen möglich.

4.4.11 Zusammenfassung

Nach der intensiven Betrachtung der existierenden Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems lässt sich festhalten, dass der überwiegende Anteil der Lösungsverfahren eine sequenzielle Vorgehensweise verfolgt und damit eine Integration über die Planungsrichtung realisiert. Bisher existieren nur wenige Lösungsverfahren, die nach der gekoppelten Vorgehensweise arbeiten und somit eine höhere Integration der beiden Teilprobleme sowie ein verbessertes Gesamtplanungsergebnis erzielen können. Einige dieser Lösungsverfahren wurden in den vorangegangenen Abschnitten detailliert vorgestellt. Dabei wurde jeweils auf die Charakteristika des zugrunde liegenden Planungsmodells sowie auf die allgemeine Vorgehensweise des entsprechenden Lösungsverfahrens und auf die Leistungsfähigkeit bzw. die Übertragbarkeit auf modifizierte Problemstellungen eingegangen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Mehrzahl der vorgestellten Lösungsverfahren speziell für die jeweils unterstellten Planungsmodelle entwickelt wurden. Während sich die von den jeweiligen Autoren vorgestellten Problembeschreibungen noch auf einen allgemeinen Fall beziehen, wurden die verwendeten Planungsmodelle im Zuge der Evaluation stark vereinfacht. Dadurch konnten die Lösungsverfahren nur an sehr kleinen Probleminstanzen evaluiert werden. Aus dieser starken Vereinfachung ergibt sich auch nur eine sehr eingeschränkte Übertragbarkeit auf abgewandelte Problemstellungen. Lediglich die Lösungsverfahren, die genetische Algorithmen verwenden, sind auf ein breites Spektrum von Problemstellungen anwendbar, was aber in der Natur genetischer Algorithmen begründet liegt.

Weiterhin lässt sich festhalten, dass die nach der gekoppelten Vorgehensweise arbeitenden Lösungsverfahren für die betrachteten Szenarien ein deutliches Verbesserungspotenzial aufweisen. Darüber hinaus sind diese Lösungsverfahren durch eine höhere Integration der beiden Teilprobleme gekennzeichnet als die Lösungsverfahren, die eine Integration über die Planungsrichtung anstreben.

Auf Basis der Analyse der in der Literatur verfügbaren und der hier vorgestellten Lösungsverfahren können die jeweiligen Stärken und Schwächen als allgemeine Anforderungen an das in dieser Arbeit zu entwickelnde Lösungsverfahren formuliert werden. Daraus ergibt sich, dass das zu entwickelnde Lösungsverfahren entsprechend der gekoppelten Vorgehensweise entworfen werden soll und folglich eine hohe Integration der Teilprobleme garantiert werden kann. Neben einer möglichst hohen Lösungsgüte soll darüber hinaus auch eine einfache Übertragbarkeit und Anwendbarkeit des zu entwickelnden Lösungsverfahrens auf abgewandelte Planungsmodelle des hier betrachteten integrierten Planungsproblems gegeben sein.

5 Integriertes Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration

Dieses Kapitel widmet sich der Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens für das Problem der integrierten Betrachtung von Produktion und Transport. Um eine möglichst breite Anwendbarkeit des Ansatzes der mehrstufigen Dekomposition und Integration gewährleisten zu können, wurde zunächst ein Framework entwickelt. Dieses beschreibt die allgemeine Funktionsweise dieses Ansatzes und bietet somit bewusst einen Gestaltungsspielraum bei der Auswahl der zu verwendenden Methoden, deren unterschiedlich gute Eignung sich in Abhängigkeit vom betrachteten Szenario darstellt. Aufbauend auf diesem Framework wird im sich daran anschließenden Abschnitt der vorhandene Gestaltungsspielraum genutzt und ein detailliertes Lösungsverfahren vorgestellt, dessen Entwicklung dem Hauptziel dieser Arbeit entspricht.

5.1 Framework für Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration

In den vorangegangenen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass bisherige Lösungsverfahren die Dekomposition nutzen und darauf aufbauend eine sequenzielle produktions- bzw. transportorientierte Vorgehensweise verfolgen. Für eine stärkere Integration der beiden Teilprobleme ist es jedoch erforderlich diese einseitige, sequenzielle Struktur aufzubrechen und die beiden Teilprobleme stärker miteinander zu verzahnen. Um dieser Notwendigkeit Rechnung zu tragen, wurde von Scholz-Reiter und Meinecke (2013) ein Framework entwickelt, dass bereits durch die Funktionsweise eine stärkere Integration der Teilprobleme verspricht. Dabei kommt eine neue Strukturierung des Lösungsprozesses mit einer mehrstufigen Dekomposition und Integration zur Anwendung. Das entwickelte Framework und die damit verbundene prinzipielle Funktionsweise sind in der Abbildung 25 dargestellt und werden nachfolgend detailliert beschrieben.

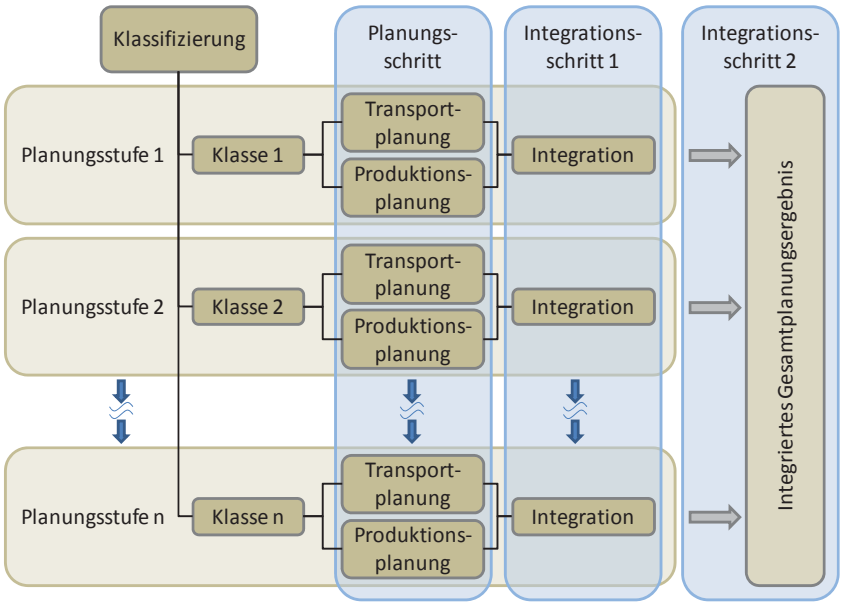


Abbildung 25: Framework für Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration

Eine Klassifizierung der Gesamtmenge aller vorliegenden Aufträge in kleinere Teilmengen stellt den Beginn des allgemeinen Lösungsverfahrens dar. Da unter einer Dekomposition im Allgemeinen lediglich die Zerlegung eines Problems in eine Anzahl kleinerer Teilprobleme verstanden wird, stellt dieser Schritt die erste Stufe der Dekomposition dar. Die Klassifizierung kann beispielsweise auf Basis der Dringlichkeit jedes einzelnen Auftrags erfolgen. Als Ergebnis der Klassifikation ist jeder einzelne Auftrag einer Klasse zugeordnet wobei diese die Grundlage für die weiteren Schritte der entsprechenden Planungsstufe bilden. Als wesentliche Elemente dieser allgemeinen Funktionsweise werden die Begriffe Klassifikation bzw. Klassifizierung und Dekomposition in den folgenden Abschnitten noch vertieft.

Anschließend wird für die Aufträge jeder Klasse eine weitere Dekomposition durchgeführt, die einer Zerlegung entsprechend der einzelnen Teilprobleme entspricht. Durch das Lösen der Teilprobleme im Planungsschritt werden Planungsergebnisse erzeugt, die für das jeweilige Teilproblem sehr gut sind, da sie sich an den entsprechenden Zielkriterien des Teilproblems orientieren. Anschließend werden diese Teilergebnisse auf jeder Planungsstufe im ersten Integrationsschritt aufeinander abgestimmt. Nach Abschluss dieses ersten Integrationsschritts werden die bereits integrierten Teilergebnisse einer jeden Planungsstufe in einem weiteren Integrationsschritt zu einem Gesamtplanungsergebnis zusammengesetzt. Das integrierte Teilergebnis der vorhergehenden Planungsstufe dient somit als Input für das integrierte Gesamtplanungsergebnis, das durch die integrierten Teilergebnisse der nachfolgenden Planungsstufen weiter vervollständigt wird.

Durch diese Funktionsweise entsteht sukzessive ein integriertes Gesamtplanungsergebnis, das aus den bereits integrierten Teilergebnissen der einzelnen Planungsstufen zusammengesetzt ist. Die Unterteilung des Planungsprozesses in mehrere iterativ ablaufende Planungsstufen garantiert eine deutlich stärkere Verzahnung beider Teilprobleme.

Durch dieses Framework ergeben sich in vier Bereichen Gestaltungsmöglichkeiten bei der Entwicklung eines konkreten Lösungsverfahrens:

Die erste Gestaltungsmöglichkeit liegt in der Durchführung der Klassifikation. Dabei handelt es sich um die Wahl des Klassifizierungskriteriums sowie um die Definition der Klassengrenzen und damit um die Festlegung der Anzahl der Planungsstufen. Eine hohe Anzahl an Planungsstufen reduziert die Komplexität und damit die Lösungsdauer innerhalb einer jeden Planungsstufe, wirkt sich aber negativ auf das Optimierungspotenzial aus.

Die Auswahl der Methoden zur Lösung der Teilprobleme im Planungsschritt stellt die zweite Gestaltungsmöglichkeit dar. Dabei können einerseits neu entwickelte Lösungsverfahren zur Anwendung kommen. Andererseits kann auch auf bekannte Lösungsverfahren zurückgegriffen werden, die bereits in großem Umfang für die jeweiligen Teilprobleme entwickelt und oben vorgestellt wurden.

Die dritte und gleichzeitig eine der wichtigsten Möglichkeiten zur Gestaltung bei der Entwicklung eines konkreten Lösungsverfahrens ist die Entwicklung bzw. die Auswahl von Methoden zur Abstimmung der einzelnen Teilergebnisse auf jeder einzelnen Planungsstufe im ersten Integrationsschritt. Die Abstimmung der beiden Teilergebnisse erfolgt in der Regel durch eine Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge des Produktionsplans bzw. des Transportplans unter Berücksichtigung der Restriktionen und Ziele des jeweils anderen Teilproblems. Das Ziel dieses Integrationsschrittes ist somit die Abstimmung der Ergebnisse aus den beiden Teilproblemen im Hinblick auf eine Optimierung des Gesamtplanungsergebnisses der jeweiligen Planungsstufe. Unter dem Aspekt der Optimierung ergibt sich die Notwendigkeit der Formulierung einer Bewertungs-

funktion, anhand derer entschieden wird, ob eine Verbesserung der Teilergebnisse bzw. des Gesamtplanungsergebnisses der jeweiligen Planungsstufe vorliegt.

Die letzte Gestaltungsmöglichkeit liegt darin, aus den Gesamtplanungsergebnisses der jeweiligen Planungsstufe im zweiten Integrationsschritt ein übergeordnetes Gesamtplanungsergebnis zu erzeugen. An dieser Stelle geht es ebenfalls um die Integration von Planungsergebnissen, allerdings ändert sich hier deren Natur. Im Gegensatz zur dritten Gestaltungsmöglichkeit bezieht sich die Abstimmung nun auf die Aneinanderreihung der Gesamtplanungsergebnisse der jeweiligen Planungsstufen zu einem übergeordnetes Gesamtplanungsergebnis und dessen Optimierung im Sinne einer Auftragskonsolidierung zur Vermeidung von Rüstvorgängen.

5.1.1 Klassifikation

Das Ziel einer Klassifikation ist die Zuordnung von Elementen einer Menge zu vorher definierten Klassen anhand der Ausprägung von Merkmalen oder Variablen der Elemente. Für die Durchführung einer Klassifikation ist die Definition von Klassen hinsichtlich ihrer Anzahl und ihrer Klassengrenzen notwendig. Im Zuge der Klassifikation wird sukzessive jedes Element der Menge auf die Ausprägung der Klassifikationsmerkmale untersucht. Liegen die Ausprägungen innerhalb der definierten Grenzen für eine Klasse, so wird dieses Element dieser Klasse zugeordnet. (vgl. [Ester und Sander, 2000] und [Bacher et al., 2010])

In der Logistik werden logistische Objekte beispielsweise hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen, ihres Gewichts oder ihrer Beschaffenheit als Schüttgut oder Stückgut klassifiziert. Im Kontext der Planung von Aufträgen ist z. B. eine Klassifikation mit Hinblick auf die Dringlichkeit der Aufträge relevant. Auch bei der Entwicklung eines nach dem Pull-Prinzip arbeitenden unternehmensübergreifenden Planungs- und Steuerungsverfahrens, wurde die Methode der Klassifikation erfolgreich verwendet (vgl. [Scholz-Reiter et al., 2009], [Scholz-Reiter et al., 2010] und [Scholz-Reiter und Meinecke, 2011]).

5.1.2 Dekomposition

Die Methode der Dekomposition wurde von Dantzig und Wolfe (1960) entwickelt und im Laufe dieser Arbeit bereits mehrfach angesprochen. Der Kern der Dekomposition besteht in der Zerlegung eines Gesamtproblems in mehrere Teilprobleme, die zunächst unabhängig voneinander gelöst werden. Ausgehend von diesen Lösungen der Teilprobleme werden diese unter der Regie eines Koordinators in einem endlichen Prozess aufeinander abgestimmt. Bei einer detaillierten Betrachtung der Methode der Dekomposition wird deutlich, dass die Autoren nach einer Methode gesucht haben, komplexe Probleme mit mehreren gleichberechtigten Partnern in akzeptabler Zeit zu lösen.

Am Beispiel der Zerlegung des Gesamtproblems in zwei einzelne Teilprobleme erläutern die Autoren die Vorgehensweise der Methode. Nach der Zerlegung in die zwei einzelnen Teilprobleme wird für jedes der Teilprobleme eine Startlösung bestimmt, die für das jeweilige Teilproblem die beste erreichbare Lösung darstellt. Jede Teillösung berücksichtigt dabei die für sie relevanten Restriktionen. Diese Startlösungen werden an einen unabhängigen Koordinator übermittelt, der daraufhin ein Preissystem für die einzelnen Teile der Gesamtlösung erstellt. Zusätzlich wird ein Bonus ausgelobt, wenn einer der beiden Partner auf Basis des Preissystems eine kostengünstigere Lösung für sein Teilproblem findet. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob diese verbesserte Teillösung für den anderen Partner durchführbar ist. Die Aufgabe des Koordinators besteht nun darin, diese kostengünstigere Teillösung mit bereits zu früheren Zeitpunkten vorgelegten Teillösungen zu

kombinieren und dabei die Durchführbarkeit und die Einhaltung der Restriktionen sicherzustellen. Auf Basis dieser verbesserten Gesamtlösung wird durch den Koordinator ein neues Preissystem ermittelt, woraufhin die Partner wiederum aufgefordert sind, auf Basis des neuen Preissystems verbesserte Teillösungen zu entwickeln. [Dantzig und Wolfe, 1960]

Die Methode der Dekomposition wurde von verschiedenen Autoren erfolgreich im Zuge der Entwicklung von Heuristiken zur Lösung logistischer Fragestellungen angewendet (vgl. z. B. [Sharp et al., 1970], [Federgruen und Zipkin, 1984], [Cohen und Lee, 1988] sowie [Fumero und Vercellis, 1999]). Dabei wird in den meisten Fällen das von Dantzig und Wolfe (1960) vorgestellte und bereits an verschiedenen Stellen in dieser Arbeit beschriebene Prinzip der Zerlegung eines Problems in mehrere, kleinere Teilprobleme übertragen. Den Prozess der Integration der Teillösungen zu einer Gesamtlösung und einer Abstimmung der Teillösung aufeinander gestalten die verschiedenen Autoren unterschiedlich. Insbesondere im Bereich der in dieser Arbeit betrachteten integrierten Planung kommt die Methode der Dekomposition häufig zur Anwendung, da sich das integrierte Gesamtproblem einfach in die beiden Teilprobleme Produktions- und Transportplanung zerlegen lässt. Auch die Methode der Dekomposition wurde bei der oben erwähnten Entwicklung eines unternehmensübergreifenden Planungs- und Steuerungsverfahrens erfolgreich angewendet (vgl. [Scholz-Reiter et al., 2009], [Scholz-Reiter et al., 2010] und [Scholz-Reiter und Meinecke, 2011]).

5.2 Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration

In diesem Abschnitt wird aufbauend auf dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Framework ein detailliertes Verfahren zur Lösung des IPODS entwickelt. Dazu werden die zuvor dargestellten Gestaltungsspielräume durch die Festlegung auf bestimmte Methoden und Vorgehensweisen genutzt. Das entwickelte Lösungsverfahren wird im Folgenden auch mit der Abkürzung MSDI (**M**ehr**S**tufige **D**ekomposition und **I**ntegration bzw. (engl.) **m**ulti **s**tep **d**ecomposition and **i**ntegration) bezeichnet. Das MSDI-Lösungsverfahren wurde bereits im Rahmen dieser Arbeit von Meinecke und Scholz-Reiter (2014) veröffentlicht und dabei auf das im Kapitel 6 vorgestellte Evaluationsszenario angewendet.

Klassifikation

Für eine Klassifizierung der Gesamtmenge aller vorliegenden Aufträge werden diese zunächst entsprechend ihrer Dringlichkeit sortiert, sodass der Auftrag mit dem frühesten Liefertermin den ersten Platz in der Auftragsliste belegt. Die anderen Aufträge folgen entsprechend mit fortschreitendem Liefertermin. In Abhängigkeit vom betrachteten Szenario sind anschließend die Anzahl der Klassen und damit auch die Klassengrenzen festzulegen. In diesem Fall enthält jede Klasse eine identische Anzahl an Aufträgen. Alternativ dazu ist es auch denkbar, dass eine Klasse nur die Aufträge enthält, deren Liefertermin innerhalb eines bestimmten Wertebereichs liegt. Nach diesen vorbereitenden Arbeiten erfolgt die eigentliche Klassifizierung, bei der jeder einzelne Auftrag einer entsprechenden Klasse zugeordnet wird.

Planungsschritt

Im sich daran anschließenden Planungsschritt wird für jede Planungsstufe eine Startlösung erzeugt in dem für die Aufträge einer Klasse eine Dekomposition in die beiden Teilprobleme durchgeführt wird. Dies bedeutet, dass die Teilprobleme Produktionsplanung und Transportplanung separat voneinander gelöst werden. Dabei wird die Produktionsplanung zwei Mal durchgeführt, wobei jeweils die oben vorgestellten Prioritätsregeln EDD und PT+WINQ+SL eingesetzt werden. Nach einem

Vergleich der mit Hilfe der Prioritätsregeln erstellten Produktionspläne wird der Produktionsplan mit den geringsten Kosten für die weiteren Schritte verwendet. Für die Transportplanung kommen das ebenfalls oben beschriebene Savings-Verfahren als Eröffnungsverfahren und als Verbesserungsverfahren sowohl das 2-opt-Verfahren als auch das 3-opt-Verfahren zum Einsatz. Durch die Anwendung dieser Verfahren kann gewährleistet werden, dass für das jeweilige Teilproblem sehr gute Lösungen erzeugt werden können, da diese sich an den entsprechenden Zielkriterien des Teilproblems orientieren. Diese sehr guten Teilergebnisse werden anschließend als Input für die Erstellung einer Lösung des jeweils anderen Teilproblems genutzt. Damit werden im Planungsschritt auf jeder Planungsstufe sowohl eine Planung nach dem Push-Prinzip als auch eine Planung nach dem Pull-Prinzip durchgeführt. Für die weiteren Schritte werden zudem die Kosten des jeweiligen Gesamtplanungsergebnisses bestimmt. Dies ist bei vielen in der Literatur verfügbaren Lösungsverfahren gleichbedeutend mit einer Integration über die Planungsrichtung. Durch diese Vorgehensweise ergeben sich aus der Sicht des jeweiligen Teilproblems jeweils ein sehr gutes und ein schlechtes Teilergebnis. Diese jeweiligen Teilergebnisse stellen obere (oG) bzw. untere Grenzen (uG) dar, die im weiteren Verlauf ebenso wie die Kosten der jeweiligen Gesamtplanungsergebnisse als Benchmark für die ökonomische Bewertung verwendet werden. Die unteren Grenzen stellen die beiden Extreme dar, die durch die beiden Teilprobleme verkörpert werden. An diesen beiden Stellen ist jeweils für eines der beiden Teilprobleme ein Kostenminimum erreicht und gleichzeitig wird in diesem Punkt eine Situation beschrieben, in der die Anforderungen des jeweils anderen Teilproblems nicht berücksichtigt werden. Eine untere Grenze entspricht somit dem Teilergebnis mit den bisher geringsten Kosten. Darüber hinaus werden die beiden Startlösungen insgesamt bewertet und miteinander verglichen. Die Startlösung mit den geringsten Gesamtkosten (Kosten_GP_Start) wird als die bisher beste Lösung gespeichert. Die Abbildung 26 stellt die Erzeugung einer Startlösung im Planungsschritt grafisch dar.

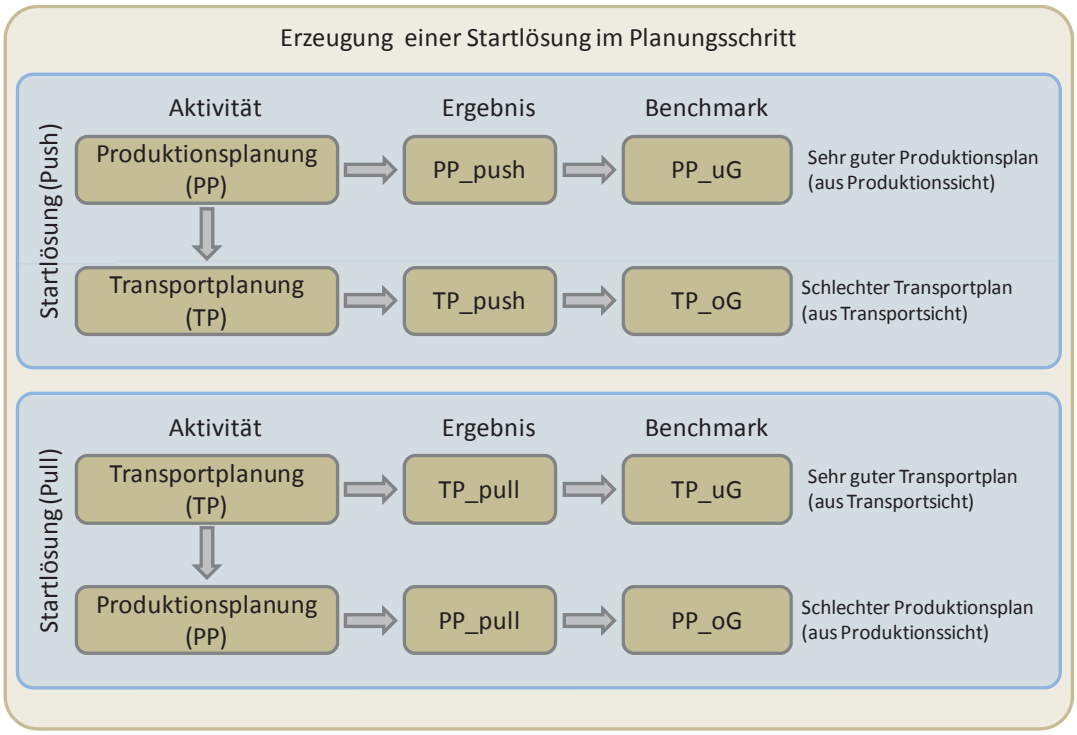


Abbildung 26: Teilergebnisse und Benchmarks der Startlösung im Planungsschritt

Integrationsschritt 1

In Analogie zu den bisher existierenden Lösungsverfahren beruht auch die Idee dieses Lösungsverfahrens auf der Vorstellung, dass jeder einzelne der beiden gleichberechtigten Partner bereit ist, das eigene Kostenminimum zu verlassen, wenn dafür das Gesamtplanungsergebnis geringere Gesamtkosten aufweist. Viele der in der Literatur vorgestellten Lösungsverfahren streben nach der Definition einer Nachbarschaft mit Hilfe von Such- und Tauschverfahren eine Modifikation der sehr guten Teilergebnisse und damit eine Integration an. Im Gegensatz dazu wird bei dem hier entwickelten Lösungsverfahren eine andere Vorgehensweise verfolgt. Die zentrale Idee dieses Lösungsverfahrens ist es, eine Anzahl vollständig alternativer Pläne als Teilergebnisse des einen Teilproblems zu entwickeln, zu jeder der Alternativen ein darauf abgestimmtes Teilergebnis des anderen Teilproblems zu entwerfen und darüber eine Integration zu erreichen. Eine Integration wird in dem Fall erreicht, wenn für beide Teilprobleme alternative Teilergebnisse entwickelt werden können, die sich von den bereits bekannten und jeweils sehr guten Teilergebnissen unterscheiden und die dennoch eine verbesserte Situation hinsichtlich der Gesamtkosten aufweisen. Dieses Ergebnis wird in dem Fall erreicht, wenn die aus den Teilergebnissen resultierenden Kosten zwischen den in der Startlösung ermittelten oberen und unteren Grenzen liegen.

Bei dem hier vorgestellten Lösungsverfahren wurde Transportplanung als das zuerst betrachtete Teilproblem festgelegt und das oben beschriebene Sweep-Verfahren zur Erzeugung alternativer Transportpläne (aTP) ausgewählt. Durch die Funktionsweise des Sweep-Verfahrens kann sichergestellt werden, dass es sich um systematisch erzeugte und alternative Transportpläne handelt. Damit ergeben sich bei einer Anzahl von n Knoten folglich n alternative Transportpläne, wobei die Knoten die jeweiligen Transportziele und das Depot den Koordinatenursprung im Distributionsnetz repräsentieren. Nach der Erzeugung der alternativen Transportpläne werden diese einzeln hinsichtlich ihrer Kosten bewertet (Kosten_aTP). Das Ziel dieser Bewertung ist es, die alternativen Transportpläne zu eliminieren, deren Kosten oberhalb der oberen Grenze (TP_oG) liegen. In einem solchen Fall würde der betreffende Transportplan von der Startlösung des Push-Verfahrens dominiert werden. Durch diese erste Stufe der Bewertung ist es bereits möglich, die nachfolgend zu betrachtende Anzahl der Alternativen zu verringern und damit die Komplexität und die Lösungsdauer zu reduzieren.

Die verbliebenen alternativen Transportpläne werden im Zuge des Pull-Verfahrens als Eingangsgrößen für die sich anschließende Produktionsplanung betrachtet. Als Ergebnis entsteht somit eine Anzahl alternativer Gesamtplanungsergebnisse (aGP) in jeder Planungsstufe, die sich jeweils aus den Teilergebnissen für die Produktions- und Transportplanung ((aPP) und (aTP)) zusammensetzen. Diese werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Kosten bewertet und mit den Ergebnissen der Startlösung verglichen. Das kostengünstigste der alternativen Gesamtplanungsergebnisse bildet als bestes Ergebnis einer Planungsstufe die Grundlage für den zweiten Integrationsschritt. Auf Grund dieser Vorgehensweise kann das vorgestellte Lösungsverfahren als Greedy-Algorithmus bezeichnet werden, da nur das beste Gesamtplanungsergebnis an den zweiten Integrationsschritt übergeben wird. Zur Verdeutlichung des beschriebenen Ablaufs sind die einzelnen Schritte in der Abbildung 27 dargestellt.

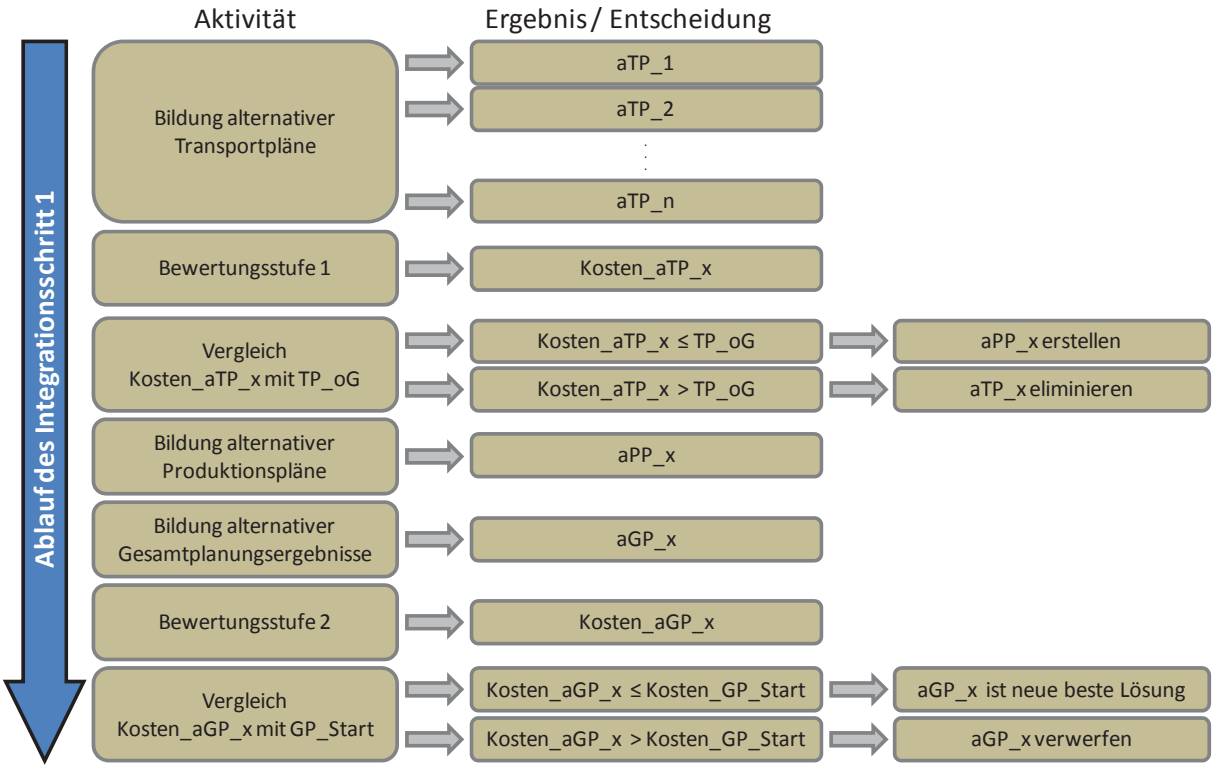


Abbildung 27: Ablauf und Ergebnisse im ersten Integrationsschritt

Integrationsschritt 2

Nach Abschluss dieses ersten Integrationsschritts werden die bereits integrierten Gesamtplanungsergebnisse einer jeden Planungsstufe im zweiten Integrationsschritt zu einem übergeordneten Gesamtplanungsergebnis zusammengeführt und aufeinander abgestimmt. Die Zusammenführung zu einem übergeordneten Gesamtplanungsergebnis geschieht dabei durch die Aneinanderreihung der Gesamtplanungsergebnisse der jeweiligen Planungsstufen. Die Abstimmung der einzelnen Gesamtplanungsergebnisse der jeweiligen Planungsstufen und damit die Optimierung des übergeordneten Gesamtplanungsergebnisses stellt die zweite Integration dar. Im Gegensatz zum ersten Integrationsschritt weist diese Integration einen anderen Charakter auf.

Das Ziel der Integration im zweiten Integrationsschritt ist die Auftragskonsolidierung zur Vermeidung von Rüstvorgängen. Da theoretisch auch Rüstvorgänge bei der Berechnung der Gesamtkosten berücksichtigt werden können, ergibt sich durch die Reduzierung von Rüstvorgängen ein Potenzial zur Minimierung der Gesamtkosten. Dazu wird an den Schnittstellen zwischen den Gesamtplanungsergebnissen zweier aufeinanderfolgender Planungsstufen eine Nachbarschaft definiert und diese hinsichtlich Vertauschungsmöglichkeiten untersucht, die zur einer Vermeidung von Rüstvorgängen führen. Durch diese Funktionsweise entsteht im zweiten Integrationsschritt sukzessive ein integriertes und übergeordnetes Gesamtplanungsergebnis, dass aus den bereits integrierten Gesamtplanungsergebnissen der einzelnen Planungsstufen zusammengesetzt ist. Dadurch wird eine deutlich stärkere Verzahnung beider Teilprobleme gewährleistet.

6 Evaluation des entwickelten MSDI-Lösungsverfahrens

In diesem Kapitel wird die Evaluation des zuvor entwickelten MSDI-Lösungsverfahrens beschrieben. Dazu wird zunächst ein Evaluationsszenario definiert, das in seiner Gesamtheit aus konkreten Szenarien der jeweiligen Teilprobleme besteht. Anschließend wird anhand dieses Evaluationsszenarios eine Simulationsstudie durchgeführt, deren Aufbau und deren Parametereinstellungen erläutert werden. Darüber hinaus werden die Vergleichsverfahren überblicksartig vorgestellt, die für einen Leistungsvergleich herangezogen wurden. In dem darauf folgenden Abschnitt werden die Evaluationskriterien definiert und erläutert, die sowohl für den Leistungsvergleich angewendet werden. Weiterhin werden in diesem Kapitel relevante Aspekte der Verifikation, der Validierung und der gewählten Implementierung aufgriffen. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Evaluation detailliert vorgestellt und diskutiert.

6.1 Evaluationsszenario

Teilszenario Produktion

Für das Teilszenario Produktion wurde im Wesentlichen auf einen Ausschnitt eines reales Szenario zurückgegriffen, dass bereits im Rahmen des ISETEC-2-Projekts LogPRo durch Scholz-Reiter et al. (2009) sowie Scholz-Reiter et al. (2010) und Scholz-Reiter und Meinecke (2011) untersucht und im Rahmen dieser Arbeit abstrahiert wurde. Die Übertragung des unter anderem im Projekt LogPRo untersuchten Szenarios des Automobilterminals Bremerhaven auf das hier verwendete Szenario bezieht sich dabei auf die Beschreibung struktureller Elemente der Werkstattfertigung. Die tatsächlich auf dem Automobilterminal Bremerhaven verwendeten Planungsmethoden und Detailprozesse wurden aus simulationstechnischen Gründen nicht übernommen. Dadurch entsteht ein vereinfachtes Produktionsszenario, dessen Komplexität dennoch ausreichend für die Evaluation des MSDI-Lösungsverfahrens ist. Um den Bezug zwischen dem Automobilterminal als realem Anwendungsszenario und dem hier verwendeten Teilszenario herstellen zu können, wird bei der nachfolgenden Beschreibung auf die entsprechenden Parallelen hingewiesen.

Das Automobilterminal Bremerhaven gehört zu den weltweit größten Automobilhäfen mit Stellflächen für etwa 90.000 Fahrzeuge. Das Terminal ist ein Umschlagspunkt für Fahrzeuge für den Im- und Export und bietet darüber hinaus weitere Dienstleistungen wie die technische Bearbeitung und Modifikation sowie die Distribution von Fertigfahrzeugen an [Mattfeld, 2006]. Da sich das Teilszenario Produktion auf die Werkstattfertigung bezieht, wird auf den Ausschnitt der technischen Bearbeitung und Modifikation fokussiert, der von einem auf dem Gelände des Autoterminals ansässigen Technikdienstleister ebenfalls mit dieser Form der Fertigungsorganisation durchgeführt wird. Die technische Bearbeitung und Modifikation umfassen beispielsweise Umbau- sowie Lackierarbeiten von Fahrzeugen sowie den Einbau von Zubehör.

Für die Durchführung dieser Arbeiten stehen dem Technikdienstleister auf dem Automobilterminal Bremerhaven drei Hallen zur Verfügung, die Werkstätten darstellen und in denen jeweils unterschiedliche Arbeiten ausgeführt werden können. Innerhalb einer jeden Halle sind für die Bearbeitung der Fahrzeuge drei identische Arbeitsstationen eingerichtet, die in diesem Teilszenario als Maschinen bezeichnet werden. Während diese Arbeitsstationen in einer Halle an den Fahrzeugen Um- und Einbauten durchführen, sind beispielsweise in einer anderen Halle drei Fließbänder

installiert, mit deren Hilfe die Fahrzeuge entkonserviert und betankt werden. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Arbeiten, die in den einzelnen Werkstätten durchgeführt werden können.

Tabelle 1: Zuordnung von Aufgaben zu den Werkstätten

Werkstatt	von den Arbeitsstationen einer Werkstatt durchzuführende Arbeiten
1	Sonderaktionen
1	Entkonservieren
1	Tanken
2	kleine PKW-Umbauten
2	Fahrzeuginspektionen
2	Kleine Zubehöreinbauten
3	Innenraumbearbeitung
3	Waschen
3	Große Zubehöreinbauten

Vor jeder der Hallen existiert eine Vorstaufläche, auf der die Fahrzeuge bis zum Beginn der Bearbeitung verbleiben. Damit erfüllen diese Vorstauflächen die Funktion einer Warteschlange. Alle Fahrzeuge müssen im Zuge ihrer Bearbeitung alle drei Hallen durchlaufen und werden nach der vollständigen Bearbeitung zunächst auf einer Nachstaufläche bis zum Beginn des Verlade- und Transportprozesses abgestellt. Diese Nachstaufläche entspricht damit dem im Standardmodell beschriebenen Zwischenspeicher. Durch die schematische Darstellung dieser aus einem realen Szenario abgeleiteten Struktur ergibt sich das in der Abbildung 28 schematisch dargestellte Teilszenario der Produktion.

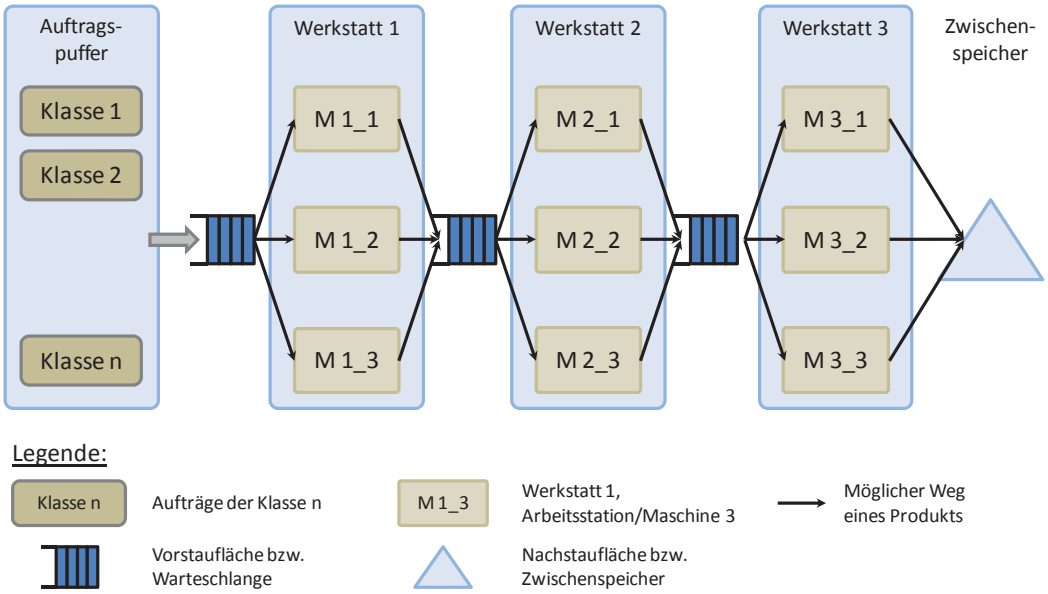


Abbildung 28: Teilszenario Produktion

Teilszenario Transport

Das ebenfalls im Rahmen des ISETEC-2-Projekts LogPRo untersuchte Transportszenario wurde für dieses hier verwendete Teilszenario nicht angewendet. Bei einer Betrachtung des in diesem Projekt untersuchten Distributionsnetzes entspricht das Automobilterminal in Bremerhaven einem Depot mit Randlage in einem Netz mit Knoten, die sich über das gesamte Bundesgebiet erstrecken. Wegen dieser geografischen Randlage, die nicht dem idealen Standort entspricht und den daraus resultierenden und oben beschriebenen Folgen für die Anwendung von Lösungsverfahren der Transportplanung wird ein anderes aus der Literatur bekanntes Distributionsnetz mit einem Depot in Zentrallage verwendet.

Im hier betrachteten Teilszenario kommt daher das Distributionsnetz von Scholz-Reiter et al., (2008a) zur Anwendung. Dieses besteht aus den 17 größten Städten in Deutschland als Knoten und einem Depot in zentraler Lage in Kassel als Koordinatenursprung. Das Depot kann gleichzeitig als Produktionsstandort aufgefasst werden, wobei der oben abgebildete Zwischenspeicher das Verbindungsglied zwischen dem Teilszenario Produktion und dem Teilszenario Transport darstellt. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten wird durch ungerichtete Kanten hergestellt, die dem Netz der Bundesautobahnen entsprechen. Damit ergibt sich nach Scholz-Reiter et al., (2008a) das in der Abbildung 29 dargestellte, einstufige Distributionsnetz.

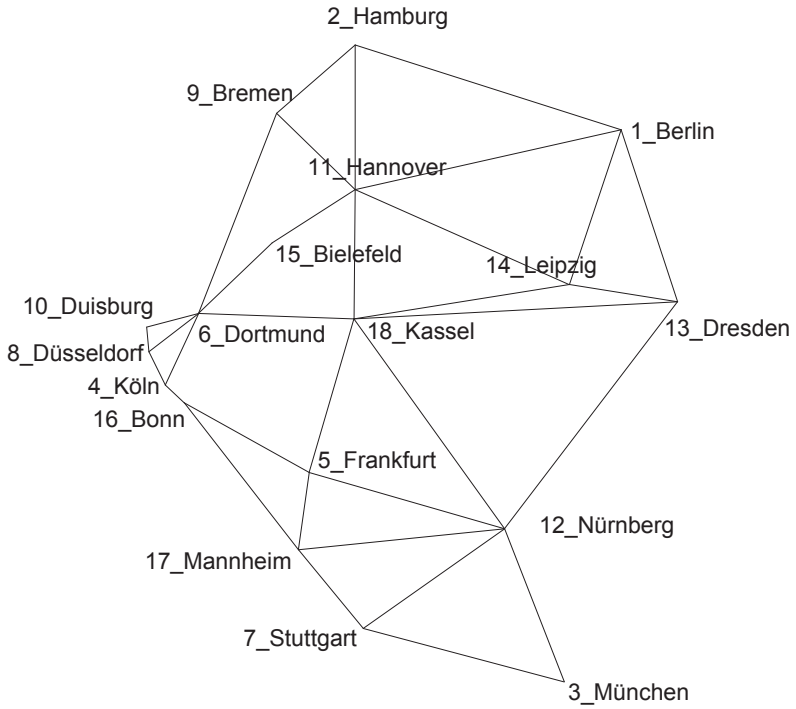


Abbildung 29: Teilszenario Distribution

6.2 Aufbau der Simulationsstudie und Experimental Setup

Zur Durchführung einer vergleichenden Untersuchung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit verschiedener Lösungsverfahren wurde die ereignisdiskrete Simulation als Werkzeug ausgewählt. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass die Ergebnisse selbst bei komplexen Szenarien, langen Simulationszeiträumen und unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse nach einer akzeptablen Lösungsdauer vorliegen [Kemppainen, 2005]. Für eine strukturierte Planung und Durchführung der

Simulationsstudie wird den Empfehlungen des VDI (2000) sowie von Law (2003) und Law (2007) gefolgt. Demnach ist für die Durchführung der Simulationsstudie unter anderem die Definition und Festlegung der entsprechenden Parameter und deren Ausprägungen erforderlich. Dies wird in der Literatur auch als experimental setup bezeichnet und im Folgenden vorgestellt. Anschließend findet eine Klassifizierung des verwendeten Planungsmodells mit Hilfe des in Abschnitt 4.1.6 entwickelten Repräsentationsschemas statt.

Auftragsdaten

Für jeden einzelnen Simulationslauf wurde ein Pool von insgesamt 500 Aufträgen erzeugt, wobei unterstellt wird, dass kein Auftrag abgelehnt und alle Aufträge sofort nach deren Eintreffen zur weiteren Planung freigegeben werden. Für die Erzeugung von Auftragsdaten wurde ein Auftragsgenerator entwickelt, der unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen einen Pool von Aufträgen erzeugt, wobei jeder einzelne Auftrag durch ein Tupel repräsentiert wird. Dieses Tupel enthält die in der Tabelle 2 dargestellten Daten, die nachfolgend eingehender beschrieben werden, sofern diese nicht selbsterklärend sind:

Tabelle 2: Daten eines Auftragstupels

Spalte	Bezeichnung	Beschreibung
1	Auftrags-ID	einmalige Nummer zur Identifizierung eines Auftrags
2	Kunden-ID	Kundennummer/Knotennummer
3	Produkttyp	Nummer des bestellten Produkts
4	Produktmenge	Anzahl des bestellten Produkte
5	due_date_pp	Liefertermin der Produktion
6	due_date_tp	Liefertermin des Transports
7	due_date_gesamt	Liefertermin beim Kunden
8	release_date	Freigabedatum

Die Kundennummer entspricht der Nummer des auftragsgebenden Knotens aus dem oben beschriebenen Distributionsnetz. Die Häufigkeit, mit der ein Kunde einen Auftrag erteilt, ist über die Summe aller Kunden gleich verteilt und liegt somit im Intervall von 1 bis 17. Insgesamt existieren drei unterschiedliche Produkttypen, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kunde einen speziellen Produkttyp bestellt, über alle Produkttypen ebenfalls gleich ist. Unabhängig vom bestellten Produkttyp beträgt die maximale Bestellmenge eins. Damit entspricht die Auftragsmenge jedes Auftrags einer elementaren und nicht mehr teilbaren Einheit. Möchte ein Kunden einen Artikel mehrfach bestellen, so müssen mehrere Aufträge ausgelöst werden.

Für die Berechnung der due dates ist zunächst die Ermittlung der Zwischenankunftszeit der Aufträge notwendig. Sie beschreibt im Allgemeinen die mittlere Zeit zwischen zwei Ereignissen [Schmidt und Makalic, 2009] und im Bereich der Simulation von Materialflüssen die Zeit zwischen zwei Einlastungszeitpunkten. Mit Hilfe der Zwischenankunftszeit wird das due date für die Produktion bestimmt, darauf aufbauend das due date für den Transport und aus der Addition dieser beiden ergibt sich der späteste Liefertermin gegenüber dem Kunden. Die Zwischenankunftszeit der einzelnen Produktionsaufträge ist exponential verteilt und wird deshalb in vielen

Materialflusssimulationen genutzt [Arnold und Furmanns, 2010]. Die mittlere Ankunftsrate (λ) wird in Abhängigkeit von der gewünschten Systemauslastung (u) und der Anzahl paralleler Maschinen (m) sowie der mittleren Prozesszeit ($\overline{p_t}$) entsprechend der folgenden Formel nach Kemppainen (2005) berechnet:

$$\lambda = m * u * \frac{1}{\overline{p_t}} \tag{63}$$

Hinsichtlich der gewünschten Auslastung wird als Startwert eine Auslastung von 80% untersucht (Variante 1 des Evaluationsszenarios). In weiteren Untersuchungen wurde dieser Wert auf 85% (Variante 2) bzw. 90% (Variante 3) sowie auf 95% (Variante 4) erhöht. Diese Auslastungen werden in verschiedenen Simulationsstudien für die Werkstattfertigung verwendet (vgl. z.B. [Holthaus, 1996])

Für die Berechnung auftragsspezifischer due dates lassen sich in der Literatur unterschiedliche Verfahren und Methoden finden. Bei der Mehrzahl der Untersuchungen, die einen Leistungsvergleich von Prioritätsregeln zum Ziel hatten, wählten die Autoren die total work content (TWK) Methode aus [Kemppainen, 2005]. Die Vorteilhaftigkeit dieser Methode gegenüber slack-basierten oder konstanten Methoden wurde nach Kemppainen (2005) in verschiedenen Untersuchungen belegt.

Das theoretisch frühest mögliche due date ergibt sich aus dem Freigabezeitpunkt und der Gesamtbearbeitungszeit eines Auftrags. Das berechnete due date ergibt sich bei der TWK Methode ebenfalls aus dem Freigabezeitpunkt und einem Vielfachen der Gesamtbearbeitungszeit eines Auftrags. Dadurch wird für Aufträge, die eine längere Gesamtbearbeitungszeit erfordern automatisch ein späteres due date errechnet. In der Literatur wird für diesen Multiplikator, der auch als due date factor bezeichnet wird, ein Wert zwischen drei für enge due dates und fünf für lockere due dates angegeben (vgl. z. B. [Holthaus und Rajendran, 1997a] und [Jayamohan und Rajendran, 2000a]). Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein Wert von drei gewählt und damit die due dates für die Produktion eines Auftrags und analog dazu für den Transport mit der folgenden Gleichung nach Kemppainen (2005) berechnet.

$$TWK_i = r_i + \sum_{l=1}^{m} p_{il} \tag{64}$$

Klassifikationsparameter

Für die erste Stufe der Klassifikation wurde eine fest definierte Anzahl von 32 Aufträgen einer Klasse zugeordnet. Dieser Wert entspricht der vierfachen Kapazität eines Transportfahrzeugs und ist das Ergebnis zahlreicher Voruntersuchungen, in denen verschiedene Werte hinsichtlich der Lösungsdauer einerseits und einer hinreichenden Problemgröße für eine Produktions- und Transportplanung andererseits getestet wurden. Durch eine zu groß gewählte Auftragsanzahl pro Klasse kommt es zu dem Effekt, dass im Zuge der Transportplanung eine Auftragskonsolidierung stattfindet, bei der eine Tour nur noch Aufträge enthält, die für einen Knoten bestimmt sind. Im Gegensatz dazu führt eine zu geringe Auftragsanzahl innerhalb einer Klasse dazu, dass die unterschiedlichen Aufträge auf Grund ihrer Dringlichkeit nicht mit anderen Aufträgen zusammen transportiert werden können. Im Ergebnis entsteht auch hier eine Tour mit nur einer sehr geringen Anzahl von darin enthaltenen Knoten oder sogar eine Direktbelieferung.

Produktionsparameter

Zur Festlegung der Bearbeitungszeiten wurde ebenfalls eine Voruntersuchung durchgeführt. Dazu wurden zunächst in der Literatur verwendete Bearbeitungszeiten auf ihre Eignung im gewählten Szenario überprüft. Zunächst muss festgestellt werden, dass es in Abhängigkeit vom Autor der Untersuchung zwei Gruppen unterschiedlicher Einstellungen für die Bearbeitungszeiten gibt. In der ersten Gruppe weisen die Bearbeitungszeiten der einzelnen Produkttypen sowohl auf den einzelnen Maschinen als auch in der Summe eine sehr große Ähnlichkeit auf. Exemplarisch sei hierzu auf das experimetal setup von Scholz-Reiter et al. (2005) verwiesen. Alle drei verwendeten Produkttypen benötigen in der Summe aller Bearbeitungszeiten 7,5 ZE (Zeiteinheiten) wobei die Bearbeitungszeiten an den einzelnen Maschinen je nach Produkttyp 2 ZE, 2,5 ZE bzw. 3 ZE betragen. Bei der Anwendung dieser Bearbeitungszeiten auf das oben beschriebene Szenario ergeben sich auf Grund der großen Ähnlichkeit nur geringe Unterschiede zwischen den ermittelten Produktionsplänen sowie zwischen den oberen und unteren Grenzen. Bei einer großen Anzahl von Simulationsläufen ergibt sich somit unabhängig von der gewählten Planungsrichtung ein Mittelwert für die Produktionskosten, der nur eine sehr geringe Streuung aufweist. Dies führt dazu, dass sich die entwickelten Produktionspläne nur in geringem Maß unterscheiden und Optimierungsmaßnahmen keine oder nur eine sehr geringe Auswirkung haben.

Im Gegensatz dazu weisen die Bearbeitungszeiten in der zweiten Gruppe betrachteter Modelle erhebliche Unterschiede auf. Beispielhaft sei das Modell von Ullrich (2013) genannt. In dem von diesem Autor vorgestellten Szenario werden die ganzzahligen Bearbeitungszeiten eines Produkttyps an einer Maschine zufällig und gleich verteilt aus einem Intervall zwischen 1 und 100 ZE gewählt. In der hier durchgeführten Voruntersuchung konnte nachgewiesen werden, dass der durch eine integrierte Planung zu generierende positive Effekt mit stärker werdendem Unterschied zwischen den Bearbeitungszeiten der jeweiligen Produkttypen auf den entsprechenden Maschinen zunimmt. Aus diesem Grund wurden die in der Tabelle 3 dargestellten Bearbeitungszeiten für das hier verwendete Szenario verwendet. Die ausgewählten Bearbeitungszeiten werden als konstant angenommen und wurden in ähnlicher Form bereits bei einer Simulationsstudie im ISETEC-2-Projekt LogPRo verwendet, deren Ergebnisse durch Scholz-Reiter et al. (2009) sowie Scholz-Reiter et al. (2010) und Scholz-Reiter und Meinecke (2011) veröffentlicht wurden.

Tabelle 3: Bearbeitungszeiten

Aufgabe	**Bearbeitungszeit [ZE]**
Entkonservieren	18
Waschen	12
Tanken	12
Kleine Zubehöreinbauten	7
Große Zubehöreinbauten	64
Innenraumbearbeitung	16
kleine PKW-Umbauten	21
Fahrzeuginspektionen	42
Sonderaktionen	30

Vor den einzelnen Werkstätten existiert eine Warteschlangen mit unbegrenzter Kapazität. Für die Nutzung dieser Warteschlangen fallen Kosten in Höhe von 1GE pro ZE an. Die Betrachtung von Kosten für die Nutzung von Warteschlangen kann damit begründet werden, dass ebenfalls Ressourcen in Form von Bereitstellungsflächen und Ladungsträgern in Anspruch genommen werden. Die Unterbrechung und spätere Fortsetzung eines Auftrags während der Bearbeitung auf einer der Maschinen ist nicht erlaubt. Jedes Produkt besitzt einen spezifischen Arbeitsumfang, der in der Tabelle 4 dargestellt ist. Im Simulationsmodell ist eine Änderung der produktspezifischen Bearbeitungsreihenfolge jederzeit problemlos möglich.

Tabelle 4: Produktspezifischer Arbeitsumfang

Produkt -typ	**Aufgabe 1 in Werkstatt 1**	**Aufgabe 2 in Werkstatt 2**	**Aufgabe 3 in Werkstatt 3**	**Summe der Bearbeitungs-zeiten [ZE]**
1	Sonderaktionen	kleine PKW Umbauten	Innenraum-bearbeitung	67
2	Entkonservieren	Fahrzeug-inspektionen	Waschen	72
3	Tanken	Kleine Zubehöreinbauten	Große Zubehöreinbauten	83

Für die Produktion eines Produkts werden im Evaluationsmodell Produktionskosten in Höhe von 1GE pro ZE erhoben. Damit entstehen für die Herstellung einer Einheit eines Produkttyps produktspezifische Kosten, die direkt proportional zur Bearbeitungszeit sind. Es fallen außerdem variable zeitabhängige Produktionskosten für die Nutzung der Warteschlangen an. Diese variablen Kosten in Höhe von 1GE pro ZE sind unabhängig vom jeweiligen Produkt. Maschinenausfälle und Rüstvorgänge werden ebenso wie der innerbetriebliche Transport zwischen den einzelnen Werkstätten in diesem Teilszenario nicht berücksichtigt.

Parameter des Zwischenspeichers

Der Zwischenspeicher verfügt über eine unbegrenzte Kapazität. Eine maximale Dauer, für die Nutzung des Zwischenspeichers ist nicht gegeben. Für die kurzfristige Aufnahme fertig produzierter Güter im Zwischenspeichers für den Zeitraum bis zum Abtransport fallen ebenfalls Kosten in Höhe 1GE pro ZE an.

Transportparameter

Zur Belieferung der Knoten aus dem Depot des oben dargestellten Distributionsnetzes wird eine Anzahl homogener Fahrzeuge mit begrenzter Kapazität von 8 Einheiten je Transportfahrzeug eingesetzt. Dabei ist es nicht erlaubt, dass ein Knoten durch verschiedene Touren bedient und dabei mehrmals innerhalb einer Periode angefahren wird. Die Belieferung der einzelnen Knoten kann ohne die Berücksichtigung von Zeitfenstern oder Warte- bzw. Servicezeiten erfolgen. Für die Durchführung einer Tour fallen entfernungsabhängige Kosten in Höhe von 1GE pro EE an. Die Entfernungen sind deterministisch und basieren auf dem oben dargestellten Distributionsnetz woraus sich die in der Tabelle 5 dargestellte Entfernungsmatrix ergibt.

Tabelle 5: Entfernungsmatrix im Teilszenario Transport

von \ nach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	280	586	574	548	494	633	559	395	547	260	439	175	160	393	597	625	381
2	280	0	776	425	492	344	655	401	105	375	150	607	476	399	251	448	570	310
3	586	776	0	574	392	604	230	612	768	633	634	175	467	430	596	558	347	476
4	574	425	574	0	190	100	367	50	315	71	292	406	578	497	193	25	243	242
5	548	492	392	190	0	235	204	228	445	249	354	200	472	396	317	180	100	190
6	494	344	604	100	235	0	418	60	215	75	212	438	522	418	80	117	298	160
7	633	655	230	367	204	418	0	405	632	426	514	210	515	478	477	347	135	357
8	559	401	612	50	228	60	405	0	301	30	278	444	588	483	179	73	282	228
9	395	105	768	315	445	215	632	301	0	265	105	584	485	375	184	337	519	286
10	547	375	633	71	249	75	426	30	265	0	267	466	576	472	168	95	306	217
11	260	150	634	292	354	212	514	278	105	267	0	464	372	262	115	316	427	165
12	439	607	175	406	200	438	210	444	584	466	464	0	305	255	428	390	245	310
13	175	476	467	578	472	522	515	588	485	576	372	305	0	120	471	565	538	390
14	160	399	430	497	396	418	478	483	375	472	262	255	120	0	371	496	469	300
15	393	251	596	193	317	80	477	179	184	168	115	428	471	371	0	218	392	131
16	597	448	558	25	180	117	347	73	337	95	316	390	565	496	218	0	220	265
17	625	570	347	243	100	298	135	282	519	306	427	245	538	469	392	220	0	266
18	381	310	476	242	199	160	357	228	286	217	165	310	390	300	131	265	266	0

Strafkosten bei verspäteter Lieferung

Neben den bereits vorgestellten Parametern werden in der Simulationsstudie auch Kosten für eine verspätete Lieferung berücksichtigt. Im Fall einer Verspätung entstehen Kosten in Höhe von 59GE pro ZE. Dieser im Vergleich zu den anderen Kostensätzen relativ hohe Wert lässt sich durch zwei Argumente rechtfertigen, weshalb Verspätungen vermieden werden sollen. Zum einen ist es in der Realität gängige Praxis, Konventionalstrafen bei verspäteter Lieferung zu verhängen, deren Höhe in der Regel vom Ausmaß der Verspätung abhängig ist. Dabei gilt die Regel, dass der Anreiz für eine pünktliche Lieferung mit zunehmender Höhe der Konventionalstrafe pro ZE steigt.

Neben diesen direkten monetären Auswirkungen einer verspäteten Lieferung kommt das Argument der Zuverlässigkeit des Lieferanten als ein weiterer wichtiger Faktor hinzu, der in dieser Simulationsstudie in die Verspätungskosten einfließt. Weist ein Lieferant eine schlechte Liefertermintreue auf, droht die Gefahr, dass dieser Lieferant bei Folgeaufträgen nicht mehr berücksichtigt wird. Dadurch verliert der Lieferant möglicherweise einen wichtigen Kunden und erleidet einen Umsatzrückgang.

Anzahl der Replikationen

Für jede der vier Varianten des Evaluationsszenarios wurden in der Simulationsstudie 1000 Replikationen durchgeführt. In jeder einzelnen Replikation wurde ein Pool von 500 Aufträgen erzeugt. Durch die hohe Anzahl von Replikationen, die hohe Auftragsanzahl und durch die Verwendung von stochastisch ermittelten Werten bei der Generierung der einzelnen Aufträge konnte sichergestellt werden, dass die Ergebnisse einen repräsentativen Charakter haben.

Klassifikation des Planungsmodells zur Evaluation

Aus dem oben vorgestellten Evaluationsszenario und den hier vorgestellten Parametern ergibt sich ein Simulationsmodell, dass mit Hilfe des entwickelten Repräsentationsschemata nachfolgend klassifiziert werden kann.

Produktionsparameter :

$[J, m]$	$[\alpha_1, \alpha_2]$
$[\circ, res, prec, r_j, m_j, p_{ij}, jdd, \odot, pprodfc, \text{pprodvc}, sdsc, \odot]$	$[\beta_1, .., \beta_{12}]$

Parameter Zwischenspeicher:

$[lcts, \infty, \text{tsc}]$	$[\text{TS1}, \text{TS2}, \text{TS3}]$

Transportparameter :

$[kn, sdpt, ssrc, unw, sldn]$	$[\text{NW1}, .., \text{NW5}]$
$[nspl, \odot, spp, vcd, lctv, iv, \text{de}, \odot, \text{de}, rout, vftc, dvtc, pentd]$	$[\text{SP1}, .., \text{SP13}]$

Zielfunktion :

$[\min c^{ipods}]$	$[\gamma]$

Der Vergleich dieser Klassifikation ergibt nur geringe Abweichungen zum oben beschriebenen Standardmodell der integrierten Planung. Diese bestehen im Wesentlichen darin, dass im Evaluationsszenario Rüstkosten auf Grund der bereits sehr hohen Komplexität nicht betrachtet werden. Eine Erweiterung des Evaluationsmodells um diesen Faktor ist jedoch problemlos möglich. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass im Evaluationsszenario die maximale Dauer für die Nutzung des Zwischenspeichers unbegrenzt ist. Auch durch diese Änderung wird die Komplexität des Evaluationsszenarios reduziert. Darüber hinaus wird die Nutzungsdauer des Zwischenspeichers erfasst und spiegelt sich über die dadurch anfallenden, zeitabhängigen Kosten in den Gesamtkosten wider.

6.3 Vergleichsverfahren

Der Nachweis der Leistungsfähigkeit eines entwickelten Lösungsverfahrens erfolgt üblicherweise über die Bestimmung der Differenz zur optimalen Lösung. Da das IPODS-Problem den NP-schweren Problemen zuzurechnen ist, kann nur für kleine Probleminstanzen eine optimale Lösung bestimmt werden. Der bei dem hier entwickelten MSDI-Verfahren gewählte mehrstufige Ansatz erfordert jedoch eine gewisse Problemgröße, die nicht mehr den sehr kleinen Probleminstanzen zugerechnet werden können. Aus diesem Grund wird die Leistungsfähigkeit des MSDI-Verfahrens nicht anhand der optimalen Lösung beurteilt. Alternativ dazu wurden Vergleichsverfahren entwickelt, die sich der

oben vorgestellten Lösungsverfahren für die jeweiligen Teilprobleme bedienen und bei derartigen Problemgrößen in akzeptabler Zeit eine gute Lösung ermitteln können. Diese Vorgehensweise des Vergleichs mit bekannten Lösungen zur Bestimmung der Lösungsgüte eines Verfahrens ist nach Cordeau et al. (2002) zulässig.

6.3.1 Push - EDD

Dieses Vergleichsverfahren arbeitet nach dem Push-Prinzip und ist ein prioritätsbasiertes Verfahren. Zur Ermittlung der Priorität eines Auftrags wird die Prioritätsregel EDD genutzt. Nachdem alle freigegebenen und im Auftragspuffer befindlichen Aufträge entsprechend ihres due dates geordnet sind, beginnt die Produktion mit dringendsten Auftrag. Eine Klassifizierung findet bei diesem Verfahren nicht statt. Nach Abschluss der Bearbeitung in der ersten Werkstatt wird ein Auftrag in die Warteschlange vor der nächsten Werkstatt eingereiht. Auf Grund der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten einzelner Aufträge kann es dazu kommen, dass ein Auftrag mit niedriger Priorität früher in der Warteschlange vor der nächsten Werkstatt eintrifft. Aus diesem Grund werden alle Aufträge in jeder Warteschlange erneut hinsichtlich ihres due dates geordnet.

Nach Abschluss des Produktionsplanung findet eine auf der Dringlichkeit der Aufträge basierende Transportplanung statt. Dabei werden die dringendsten Aufträge in der Reihenfolge ihrer Fertigstellung und bis zur Ausschöpfung der maximalen Kapazität der Transportfahrzeuge zu einer Tour zusammengestellt. Nach der Zuordnung der Aufträge zu den Touren kann jede einzelne Tour als Startlösung aufgefasst werden, die mit Hilfe des 3-opt-Verfahrens optimiert wird.

6.3.2 Push - PT+WINQ+SL

Die Vorgehensweise dieses Vergleichsverfahrens ist analog zu der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Funktionsweise. Der Unterschied liegt in der Verwendung der PT+WINQ+SL Regel zur Bestimmung der Priorität der Produktionsaufträge im Auftragspuffer bzw. innerhalb einer Warteschlange.

6.3.3 Pull - Savings

Für dieses nach dem Pull-Prizip arbeitende Vergleichsverfahren ist es notwendig, zunächst die im Auftragspuffer befindlichen Aufträge hinsichtlich ihrer Dringlichkeit beginnend mit dem dringendsten due date zu sortieren. Anschließend wird eine Klassifizierung der Aufträge durchgeführt, wobei eine Klasse jeweils 32 Aufträge umfasst. Dieser Wert, dessen Entstehung im Abschnitt 6.2 näher erläutert wird, entspricht der vierfachen Kapazität eines Transportfahrzeugs. Nach Abschluss der Klassifizierung werden für die Aufträge einer Klasse zunächst eine Transportplanung und im Anschluss eine darauf aufbauende Produktionsplanung durchgeführt.

Im Zuge der Transportplanung kommen das Savings-Verfahren als Eröffnungsverfahren sowie das 2-opt-Verfahren und das 3-opt-Verfahren als Verbesserungsverfahren zum Einsatz. Nach Abschluss der Transportplanung sind alle Aufträge einer Klasse einer Tour zugeordnet. Für die sich anschließende Produktionsplanung wird prioritätsbasiertes Verfahren eingesetzt. Dabei wird zunächst die Tour bestimmt, die den dringendsten Auftrag enthält. Alle Aufträge, die zusammen mit diesem dringendsten Auftrag einer Tour zugeordnet wurden, erhalten die höchste Priorität. Analog dazu wird mit den weiteren Touren verfahren bis allen Aufträgen eine Priorität zugeordnet wurde. Ziel dieses Prioritätsverfahrens ist es, dass alle zu einer Tour gehörenden Aufträge die Produktion möglichst zur gleichen Zeit abschließen können. Auf diese Weise kann die Verweildauer der zu einer Tour gehörenden Aufträge im Zwischenspeicher reduziert werden.

6.4 Evaluationskriterien

Die Untersuchung und Bewertung der Leistungsfähigkeit des entwickelten MSDI-Lösungsverfahrens erfolgt auf Basis eines Vergleichs mit den oben vorgestellten Vergleichsverfahren und unter Verwendung von definierten Kriterien. Diese nachfolgend beschriebenen Kriterien wurden von Cordeau et al. (2002) ursprünglich für Heuristiken zur Lösung des Vehicle Routing Problems vorgeschlagen, lassen sich aber auf Heuristiken im Allgemeinen anwenden. Darüber hinaus wird das Kriterium des Integrationsgrads bei der vergleichenden Bewertung berücksichtigt.

Lösungsgüte (Accuracy)

Die Lösungsgüte gibt die Abweichung einer ermittelten Lösung von einem Optimum mit Bezug auf die jeweilige Zielfunktion an. Bei NP-schweren Problemstellungen lässt sich eine optimale Lösung auf Grund der sehr hohen Komplexität nur für kleine Problemgrößen ermitteln. Wenn auf Grund der Problemgröße eine optimale Lösung oder untere Grenzen nicht angegeben werden können, ist nach Cordeau et al. (2002) ein Vergleich mit den besten bisher bekannten Lösungen zur Bestimmung der Lösungsgüte zulässig.

Da bereits die Teilprobleme Produktions- und Transportplanung zur Klasse der NP-schweren Probleme gehören und folglich auch das IPODS Problem ebenfalls zu dieser Klasse zählt, kann für das hier betrachtete integrierte Planungsproblem nur für kleine Problemgrößen eine optimale Lösung angegeben werden. Um die Vorteile der im Rahmen des MSDI-Lösungsverfahrens eingesetzten Methoden zur Geltung zu bringen, ist jedoch eine gewisse Größe des Planungsproblems erforderlich. Diese übersteigt die Größe der Planungsprobleme, für die eine Ermittlung der optimalen Lösung möglich ist. Aus diesem Grund wurden die in Abschnitt 6.3 vorgestellten Vergleichsverfahren definiert. Diese wurden wenn möglich adaptiert und lehnen sich daher an die existierenden und im Abschnitt 4.4 vorgestellten integrierten Lösungsverfahren an.

Wie bei der Vorstellung des Standardmodells der integrierten Planung im Abschnitt 4.2 gezeigt wurde, besteht die Zielfunktion in der Minimierung der Gesamtkosten. Dies bedeutet, dass prozessbezogene Leistungskennzahlen in ökonomische Größen umgewandelt und diese zu den prozessbezogenen Kosten addiert werden. Die Leistungskennzahl Liefertermintreue wird beispielsweise mit Hilfe von Strafzahlungen für verspätete Lieferungen abgebildet. Die Verweildauer in einer Warteschlange oder im Zwischenspeicher wird mit Hilfe eines entsprechenden Kostensatzes monetär ausgedrückt. Weiterhin wird zur Bestimmung der Transportkosten ein entfernungsabhängiger Kostensatz angewendet, um die zurückgelegte Entfernung ökonomisch zu bewerten. Folglich wird die Lösungsgüte über den Vergleich der Gesamtkosten bestimmt.

Ausführungsgeschwindigkeit (Speed)

Die Ausführungsgeschwindigkeit beschreibt die zeitliche Dauer, die zur Ermittlung einer Lösung notwendig ist. Da für die Lösungsfindung in der heutigen Zeit Computer eingesetzt werden und Informationen über Aufträge in Echtzeit zur Verfügung stehen, entspricht die Ausführungsgeschwindigkeit der Rechenzeit bzw. der Lösungsdauer. Die genaue Bestimmung der Lösungsdauer ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, weshalb ein objektiver Vergleich der Rechenzeit verschiedener Lösungsverfahren auch in der Literatur umstritten ist. Auf der methodischen Seite sind die Problemgröße und die Anzahl der Replikationen wesentliche Einflussfaktoren auf die Rechenzeit. Auf technischer Seite stellen paralleles Rechnen und die Qualität der Implementierung wichtige Einflussgrößen auf die Lösungsdauer dar.

Auf Grund der unterschiedlichen Qualität der Implementierungen und der Leistungsfähigkeit der vorhandenen technischen Ausstattung entsteht eine mangelnde Vergleichbarkeit bei der Bestimmung der Lösungsdauer. Deshalb wird in dieser Arbeit lediglich eine subjektive und qualitative Bewertung vorgenommen. Diese orientiert sich am Aufwand, der betrieben werden muss, um eine Lösung zu ermitteln. Für diese Bewertung stehen fünf mögliche Ausprägungen zur Verfügung [(++); (+); (o); (-); (--)], wobei (++) sehr hoch und (--) sehr gering bedeutet.

Einfachheit (Simplicity)

Unter der Einfachheit wird einerseits die Verständlichkeit des Verfahrens durch den Anwender verstanden. Andererseits wird die Einfachheit unter dem Blickwinkel der Implementierungsmöglichkeiten der Heuristik beurteilt. Die Verständlichkeit durch den Anwender ist nicht objektiv messbar sondern ein subjektives Empfinden. Dennoch lassen sich einige Merkmale definieren, anhand derer ein qualitativer Vergleich der Verständlichkeit und Implementierbarkeit von Heuristiken möglich ist.

Eine komplizierte Vorgehensweise sowie eine hohe Parameteranzahl wirken sich negativ auf die Verständlichkeit sowie Implementierbarkeit und folglich auch auf die praktische Anwendbarkeit einer Heuristik aus. Darüber hinaus ist die vorliegende Beschreibungsform ein wichtiges Merkmal der Verständlichkeit. Ein ausformulierter Text ist für die Mehrheit der Anwender im Gegensatz zu einer mathematischen Formulierung einfacher verständlich und folglich auch einfacher implementierbar. Weiterhin sollte die Detailtiefe bei der Beschreibung der Vorgehensweise einer Heuristik nicht zu hoch gewählt werden, da es zunächst um das Verständnis der prinzipiellen Funktionsweise geht. Analog zur Ausführungsgeschwindigkeit stehen bei die Bewertung der Einfachheit ebenfalls fünf mögliche Ausprägungen zur Verfügung [(++); (+); (o); (-); (--)], wobei (++) sehr einfach und (--) sehr schwierig bedeutet.

Flexibilität (Flexibility)

Mittels des Bewertungskriteriums der Flexibilität können Aussagen darüber getroffen werden, wie sich ein Lösungsverfahren verhält, wenn zusätzliche Restriktionen in das zugrunde liegende Planungsmodell einfließen. Von einer hohen Flexibilität kann gesprochen werden, wenn sich das betrachtete Lösungsverfahren an neue Problemstellungen und Nebenbedingungen anpassen lässt, ohne dass dies eine wesentliche Verminderung der Lösungsqualität oder der Ausführungsgeschwindigkeit zur Folge hat. Außerdem wird bei diesem Kriterium beurteilt, wie kompliziert derartige Anpassungen des Verfahrens sind [Richter, 2005]. Da es auch bei diesem Evaluationskriterium kein objektiv messbares Verfahren gibt, werden für die Bewertung der Flexibilität ebenfalls fünf mögliche Ausprägungen verwendet [(++); (+); (o); (-); (--)], wobei (++) sehr einfach und (--) sehr schwierig bedeutet.

Integrationsgrad

Mit Hilfe des Integrationsgrads wird bewertet, inwieweit die Teilprobleme die Anforderungen und Restriktionen des jeweils anderen Teilproblems bei der Ermittlung einer Lösung berücksichtigen. Im Abschnitt 4.3, in dem eine Übersicht über Verfahren zur Lösung des IPODS-Problems gegeben wurde, bzw. bei der Vorstellung einiger ausgewählter Lösungsverfahren im Abschnitt 4.4 wurde auf den Aspekt des Integrationsgrads bereits eingegangen. Dieser wird an dieser Stelle erneut aufgegriffen. Eine objektive Bewertung des Integrationsgrads ist bisher nicht bekannt und soll auch nicht im Rahmen dieser Arbeit erfolgen. Aus diesem Grund werden zur Bewertung des Integrationsgrads die

möglichen Ausprägungen [(++); (+); (o); (-); (--)] verwendet, wobei die Bewertung (++) für einen sehr hohen und (--) für einen sehr geringen Integrationsgrad steht.

6.5 Verifikation, Validierung und Implementierung

Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der aus einer Simulation gewonnen Erkenntnisse ist eine Verifikation und Validierung des in der Simulation verwendeten Modells notwendig. Die nachfolgenden Ausführungen stellen kurz die theoretischen Grundlagen dazu dar und beschreiben anschließend deren Anwendung auf das in dieser Arbeit behandelte Problem.

6.5.1 Verifikation

Die Verifikation bzw. Verifizierung beschreibt entsprechend der VDI-Richtlinie 3633 den „[..] formalen Nachweis der Korrektheit des Simulationsmodells [...]" [VDI, 2000]. Folglich ist nach Rabe et al. (2008) die Überprüfung erforderlich, ob das erstellte Simulationsmodell das konzeptionelle Modell korrekt wiedergibt. Bei der Verifikation wird nicht nur die korrekte Abbildung des Simulationsmodells überprüft, sondern auch die Korrektheit bei der Transformation vom konzeptionellen Modell (vgl. [Balci, 1998] und [Page, 2001]). Der Nachweis der vollständigen Korrektheit ist in den meisten Fällen nicht möglich, da ein Simulationsmodell eine Abstraktion des konzeptionellen Modells bzw. der Wirklichkeit darstellt und somit nicht alle beeinflussenden Parameter dargestellt werden können. Aus diesem Grund bezieht sich die Verifikation oftmals auf die Überprüfung des Programmcodes [Rabe et al., 2008].

6.5.2 Validierung

Nachdem die Verifizierung die formale Korrektheit eines Modells betrachtet, wird mit Hilfe der Validierung überprüft, ob das Simulationsmodell das Verhalten des abgebildeten Systems mit hinreichender Genauigkeit wiedergibt (vgl. [VDI, 2000], [Balci, 2003] und[Rabe et al., 2008]). Eine kontinuierliche Validierung während einer Simulationsstudie ist notwendig um dem Simulationsmodell Glaubwürdigkeit zu verleihen und die allgemeine Akzeptanz der Simulationsergebnisse zu gewährleisten [Rabe et al., 2008]. Dadurch ist es möglich, dass die anhand des Simulationsmodells getroffenen Aussagen übertragbar sind. Allerdings ist es nur bei trivialen Simulationsmodellen möglich, die vollständige Korrektheit objektiv nachzuweisen [Arnold et al., 2008]. Bei komplexen Modellen hingegen gilt ein Simulationsmodell bis zum Beweis des Gegenteils als valide. Dieser Beweis wird dabei in Form eines gezielten Beispiels erbracht, dass die Fehlerhaftigkeit offenlegt [Dijkstra, 1970]. Dennoch kann festgestellt werden, dass eine Validierung für jedes Simulationsmodell nicht standardisiert sondern auf Grund der Verschiedenheit der Formen und deren Anwendungen in der Praxis nur individuell erfolgen kann [Liebl, 1995]. Auch kann es in der Praxis keine diskrete Entscheidung darüber geben, ob ein Simulationsmodell valide ist oder nicht, da dies vom Untersuchungsgegenstand der Simulation in verschiedenen graduellen Ausprägungen der Validität abhängig ist [Liebl, 1995].

6.5.3 Verwendete Methoden zur Verifikation und Validierung

Die vollständige Verifikation und Validierung eines Simulationsmodells ist bereits bei trivialen Modellen sehr aufwendig und bei komplexen Modellen nach dem heutigen Stand der Technik nicht möglich [VDI, 2000]. Für den Bereich der Produktion und Logistik stehen eine Vielzahl von Methoden für die Verifikation und Validierung zur Verfügung [Rabe et al., 2008]. Jede dieser Methoden ist für

die Überprüfung eines speziellen Fehlers entwickelt worden. Aus diesem Grund ist es für die Verifikation und Validierung notwendig, eine Vielzahl verschiedener Methoden einzusetzen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass ein breites Fehlerspektrum untersucht und dadurch die Glaubwürdigkeit erhöht wird. Nachfolgend werden nur die Methoden und deren Anwendung kurz vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Anwendung gekommen sind.

Empirische Analyse

Mit Hilfe der empirischen Analyse wird die zu testende Implementierung auf eine Vielzahl von Testfällen angewendet und deren Ergebnisse mit bereits verfügbaren Ergebnissen verglichen. Wenn beide Ergebnisse übereinstimmen oder annähernd identisch sind, kann die Implementierung als validiert angesehen werden. [Helsgaun, 2000]

Ereignisvaliditätstest

Inhalt dieses Tests ist der Vergleich des Eintretens verschiedener Ereignisse innerhalb des Simulationsmodells mit der Realität. Dabei können zusammenhängende aber auch einzelne Ereignisse betrachtet werden, die zunächst als Hypothesen formuliert und anschließend am Simulationsmodell überprüft werden (vgl. [Rabe et al., 2008] und [Sargent, 2010]). Saisonale Schwankungen im Auftragseingang aber auch der Ausfall von Produktions- oder Transportmitteln sind Beispiele für derartige Ereignisse, die insbesondere im Teilszenario Produktion berücksichtigt wurden.

Historische Daten

Die Verwendung historischer Daten des Originalsystems im Simulationsmodell tragen nach erfolgter Datenaufbereitung ebenfalls zur Validität bei. Dazu können statische Daten, wie z. B. Daten über die Struktur, und dynamische Daten, wie beispielsweise Lagerbestände, verwendet werden (vgl. [Liebl, 1995] und [Sargent, 2010]). Im Teilszenario Produktion wurden sowohl statische als auch dynamische Daten verwendet wohingegen im Teilszenario Transport ausschließlich statische Daten herangezogen wurden.

Monitoring

Das Monitoring wird genutzt, um den zeitlichen Verlauf einer Zustandsgröße während des Simulationslaufs aufzuzeichnen und zu visualisieren [Sargent, 2010]. In dieser Arbeit wurde das Monitoring genutzt, um den Auftragseingang sowie Bestandsverlauf der einer Werkstatt vor- bzw. nachgelagerten Pufferflächen zu protokollieren und grafisch darzustellen. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, ein unerwartetes Verhalten der beobachteten Größen zu erkennen und durch entsprechende Änderungen zu korrigieren.

Syntaxanalyse

Mit Hilfe der Syntaxanalyse wird überprüft, ob der implementierte Programmcode syntaktisch richtig ist und folglich durch das Simulationswerkzeug ausgeführt werden kann. Die Syntaxanalyse überprüft lediglich die formale Richtigkeit des Programmcodes und wird durch den Programmcodeinterpreter des Simulationswerkzeugs automatisch vor jedem Start eines Simulationslaufs durchgeführt. Eine inhaltliche Prüfung des Programmcodes hinsichtlich semantischer Zusammenhänge findet nicht bei der Syntaxanalyse jedoch nicht statt.

Test von Teilmodellen

Der Test von Teilmodellen folgt ebenfalls dem Gedanken der Dekomposition bei dem das Gesamtmodell in mehrere kleinere Teile zerlegt wird. Diese kleineren Teile werden implementiert und getestet um anschließend zu einem Gesamtprogramm zusammengeführt zu werden. Diese Vorgehensweise entspricht einem bottom-up-testing [Berchtold et al., 2002] und stellt in Form von Funktionen und Unterfunktionen eine gängige Programmierpraxis dar. In dieser Arbeit wurden die verwendeten Methoden einzeln implementiert und getestet. Die Ergebnisse dieser Test sind im Abschnitt 6.5.4 aufgeführt.

Turing Test

Im Rahmen dieses Tests werden mit dem Realsystem vertrauten Experten zwei anonymisierte Datenreihen vorgelegt, von denen eine Datenreihe aus dem Realsystem und eine weitere Datenreihe aus der Simulationsstudie entstammen. Wenn die befragten Experten nicht entscheiden können, welche Datenreihe aus dem Realsystem stammt, kann die Fehlerhaftigkeit des Modells nicht nachgewiesen werden (vgl. [Liebl, 1995] und [Sargent, 2010]). Da die Daten im Teilszenario Produktion aus einem Realsystem entnommen wurden, konnte dieser Test durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen werden.

6.5.4 Implementierung verwendeter Verfahren und deren Validierung

Die Implementierung der verwendeten Verfahren aus den beiden Teilbereichen Produktionsplanung und Transportplanung sowie der weiteren verwendeten Methoden erfolgt in MatLab® R2007b [MATLAB]. Der Einfachheit wegen wird im Folgenden nur der Begriff *MatLab* verwendet. MatLab zeichnet sich dadurch aus, dass die Verwaltung der von den Programmen genutzten Speicherplätze intern erfolgt, so dass sich der Nutzer von dieser Arbeit entlastet wird. MatLab bietet darüber hinaus umfassende Möglichkeiten der ansprechenden, grafischen Darstellung von Zusammenhängen und Ergebnissen. Von diesen Möglichkeiten wird im weiteren Verlauf an den entsprechenden Stellen Gebrauch gemacht. Nachfolgend werden kurze Erläuterungen zur Implementierung der verwendeten Methoden gegeben, die jeweils als Funktionen in MatLab umgesetzt wurden. Darüber hinaus werden für die bereits existierenden Lösungsverfahren die Ergebnisse der entsprechenden Validierungen der verwendeten Implementierungen vorgestellt.

Produktionsplanung – PT+WINQ+SL

Auf eine Validierung dieser Prioritätsregel, wie sie bei einigen der nachfolgenden Verfahren angewendet wird, kann in diesem Fall verzichtet werden. Dies ist dadurch begründet, dass sich der Prioritätswert eines Auftrags bei dieser Regel lediglich durch die Addition von drei Zahlen ergibt. Diese Aufgabe erscheint trivial, weshalb kein Vergleichsszenario aus der Literatur erforderlich ist. Bei der Anwendung dieser implementierten Prioritätsregel wurde die richtige Funktionsweise erfolgreich auf Basis von Stichproben während der durchgeführten Simulationsstudie überprüft.

Produktionsplanung – EDD

Analog zur vorherigen Prioritätsregel wird auch bei dieser Prioritätsregel auf eine Validierung verzichtet, da das Ordnen von Aufträgen nach aufsteigenden Fälligkeitsterminen ebenfalls trivial erscheint und deshalb kein Vergleichsszenario aus der Literatur erforderlich ist. Auch bei dieser Prioritätsregel wurde die richtige Funktionsweise erfolgreich auf Basis von Stichproben während der durchgeführten Simulationsstudie überprüft.

Transportplanung – Savings-Verfahren

Seit der Veröffentlichung des Verfahrens durch Clarke und Wright (1964) wurden zahlreiche Varianten und Erweiterungen dieses Verfahrens entwickelt und implementiert. In der Regel ist der von den verschiedenen Autoren genutzte Quellcode nicht ausgewiesen sondern liegt als verbale Beschreibung des Verfahrens, als Ablaufdiagramm oder als Pseudo-Code vor. Aktuell ist die einzige vorhandene und frei verfügbare Implementierung des Savings-Verfahrens in der Matlog - Logistics Engineering MatLab Toolbox [MATLOG] vorhanden. Diese Toolbox beinhaltet für verschiedene Planungsprobleme zahlreiche in MatLab implementierte Lösungsmethoden. Die dort existierenden Implementierungen berücksichtigen allerdings keine Kapazitätsrestriktionen und erweitern eine vorhandene Tour nur an einem der beiden möglichen Enden. Bei der Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen kann der Fall auftreten, dass bei einer Erweiterung der Tour an einem Ende die verfügbare Kapazität überschritten wäre und dennoch eine Erweiterung der Tour an ihrem anderen Ende möglich ist. Dieser Fall wird von Clarke und Wright (1964) berücksichtigt, ist aber nicht in der vorhandenen Implementierung umgesetzt. Eine andere in der Matlog Toolbox implementierte Variante des Savings-Verfahrens berücksichtigt Zeitfenster. Dieser Fall wird in dem in dieser Arbeit unterstellten Szenario nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde nicht auf die vorhandene Matlog Toolbox zurückgegriffen sondern eine eigene Implementierung durchgeführt, die das von Clarke und Wright (1964) beschriebene Verfahren vollständig umsetzt und deren Ablaufdiagramm in Anhang 1 dargestellt ist.

Zur Validierung wurden in der Literatur verfügbare Modelle herangezogen, die eigene Implementierung auf den beschriebenen Versuchsaufbau angewendet und die Ergebnisse mit den von den einzelnen Autoren erzielten Ergebnisse verglichen. In der folgenden Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Validierung zusammenfassend dargestellt. Dabei werden neben den eigentlichen Ergebnissen auch ergänzende Erläuterungen gegeben, die eventuelle Abweichungen beschreiben und die Gründe, die dazu geführt haben. Entsprechend der Auswertung in der nachfolgenden Abbildung kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die eigene Implementierung des Savings-Verfahrens als validiert betrachtet werden kann.

Tabelle 6: Ergebnisse der Validierung des implementierten Savings-Verfahrens

Verwendetes Modell	Optimales Ergebnis	Vergleichs-ergebnis des verwendeten Modells	Ergebnis der eigenen Implementierung	Erläuterungen
[Dangelmaier, 2009] S. 1163	Tourlänge: 11 Anzahl der Touren: 2 (ermittelt mit dynamischer Programmierung)	Tourlänge: 16 Anzahl der Touren: 3	Tourlänge: 16 Anzahl der Touren: 2	Die unterschiedliche Anzahl der Touren resultiert aus einer anderen Sortierung der Liste der Savings-Paare bei gleichem Savingswert. Dadurch resultiert eine andere Betrachtungsreihenfolge und folglich auch eine andere Zusammensetzung der Tour. Die Auslastung der Transportkapazitäten ist bei identischer Gesamtstrecke bei der eigenen Implementierung höher.
[Larson und Odoni, 1981]	Nicht bekannt	Tourlänge: 397 Anzahl der Touren: 2	Tourlänge: 408 Anzahl der Touren: 3	Unterschiede in der Implementierung: [Larson und Odoni, 1981] betrachten ebenfalls den zweiten Endknoten, wenn bei erstem Endknoten nicht erweitert werden konnte. Allerdings werden nach erfolgreicher Erweiterung der Touren die Zeilen mit den inneren Knoten nicht aus der Savings-Liste gelöscht. Dadurch bricht bei [Larson und Odoni, 1981] die Tourenbildung ab, wenn die nächste Zeile in der Savings-Liste, einen Knoten enthält, der wegen Kapazitätsrestriktionen oder weil dieser betreffende Knoten bereits als innerer Knoten in der Tour verplant ist. Dadurch fallen diese Paare mit den relativ hohen Savings-Werten in die nächste Tour. Das führt im angegebenen Beispiel zu einer insgesamt kürzeren Gesamtweglänge, die aber nur minimal vom Ergebnis der eigenen Implementierung abweicht.

Transportplanung – Sweep-Verfahren

Für das Sweep-Verfahren existieren bereits Implementierungen, die allerdings für abgewandelte Fragestellungen entworfen wurden und deshalb Abweichungen zu der oben beschriebenen Vorgehensweise beinhalten. Folglich wird in dieser Arbeit eine eigene Implementierung verwendet, die der oben beschriebenen Vorgehensweise entspricht. Das von Domschke und Scholl (2010) verwendete Vergleichsszenario wurde anhand der Entfernungsmatrix rekonstruiert, um auf diese Weise die erforderlichen Polarwinkel bestimmen zu können. Da zu dieser Vorgehensweise keine Alternativen entwickelt wurden und es sich um ein starres Verfahren handelt, ist die einmalige Anwendung in einem Vergleichsmodell zur Validierung ausreichend. Das Ablaufdiagramm der getesteten eigenen Implementierung ist in Anhang 2 und das Ergebnis der Validierung in der folgenden Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Validierung des implementierten Sweep-Verfahrens

Verwendetes Modell	Optimales Ergebnis	Vergleichs-ergebnis des verwendeten Modells	Ergebnis der eigenen Implementierung	Erläuterungen
[Domschke und Scholl, 2010]	Nicht bekannt	Tourlänge: 41,9 Anzahl der Touren: 3	Tourlänge: 41,9 Anzahl der Touren: 3	

Als Ergebnis dieser Validierung kann festgehalten werden, dass in der Implementierung die beschriebene Vorgehensweise richtig umgesetzt wurde. Aus diesem Grund kann die eigene Implementierung des Sweep-Verfahrens im Weiteren verwendet werden.

Transportplanung – 2-opt-Verfahren

Für das 2-opt-Verfahren existieren ebenfalls zwei Implementierungen in der Matlog Toolbox [MATLOG]. Die mit „tsp2opt“ bezeichnete Implementierung betrachtet wiederum Zeitfenster bei der Anlieferung und wird daher nicht weiter berücksichtigt. Bei der mit „twoopt“ bezeichneten Implementierung handelt es sich um eine Umsetzung in enger Anlehnung an Steiglitz und Weiner (1968) sowie Reinelt (1994). Dabei werden beginnend an einer beliebigen Kante, alle bisher nicht in der Tour enthaltenen Kanten hinsichtlich einer Verkürzung der Tourlänge untersucht. In dieser Arbeit wird die Implementierung von [LUNDGREN] verwendet, die inhaltlich der mit „twoopt“ bezeichneten Implementierung entspricht aber im Gegensatz dazu eine verbesserte Übersichtlichkeit aufweist. Analog zum vorangegangenen Abschnitt werden in der nachfolgenden Tabelle 8 die Ergebnisse der Validierung zusammenfassend dargestellt und ergänzende Erläuterungen gegeben.

Tabelle 8: Ergebnisse der Validierung des implementierten 2-opt-Verfahrens

Verwendetes Modell	Optimales Ergebnis	Vergleichs-ergebnis des verwendeten Modells	Ergebnis der eigenen Implementierung	Erläuterungen
[Saiyed, 2012]	Nicht bekannt	Tourlänge: 41	Tourlänge: 40	Unterschied ergibt sich dadurch, dass [Saiyed, 2012] nur gegenüberliegende Kanten hinsichtlich einer Verbesserung untersucht. Dadurch, dass darüber hinaus keine weiteren Kanten hinsichtlich einer Verbesserung untersucht werden, wird Optimierungspotenzial verschenkt. In der eigenen Implementierung, werden alle für einen Tausch in Frage kommenden Kanten untersucht, was sich in einem verbesserten Ergebnis ausdrückt.
[Grünert und Irnich, 2005a]	Nicht bekannt	Tourlänge: 28,69	Tourlänge: 30,7	Unterschied ergibt sich dadurch, dass [Grünert und Irnich, 2005a] das Verfahren mehrmals hintereinander anwenden. Die Autoren beschreiben die Zwischenergebnisse. Daraus geht hervor, dass das Ergebnis nach einmaliger Anwendung dem Ergebnis der eigenen Implementierung entspricht. Bei einer weiteren Anwendung der eigenen Implementierung auf dieses erste Zwischenergebnis ergibt sich im Vergleich zu [Grünert und Irnich, 2005a] eine kürzere Tour mit einer Gesamtlänge von 27,8. Dabei ist zu berücksichtigen, dass [Grünert und Irnich, 2005a] das 2-opt Verfahren insgesamt vier Mal anwenden, um die von Ihnen angegebene Tourlänge zu erreichen. Bei der der eigenen Implementierung genügt die zweimalige Anwendung des Verfahrens, um ein besseres Ergebnis zu erzielen, das sich auch bei weiteren Wiederholungen nicht mehr verbessern lässt.

Für die eigene Implementierung werden die Ergebnisse der Validierung als Kennzeichen für die richtige und effiziente Ausführung des 2-opt-Verfahrens bei einer gleichzeitig hohen Lösungsqualität angesehen. Aus diesem Grund wird diese Implementierung als eine Variante eines Verbesserungsverfahrens für die weiteren Untersuchungen verwendet.

Transportplanung – 3-opt-Verfahren

Für das 3-opt-Verfahren liegen bereits zahlreiche Implementierungen vor, die sich teilweise in ihrer Vorgehensweise unterscheiden oder ausschließlich das Or-opt Verfahren als Spezialfall des 3-opt-Verfahrens betrachten. Aus diesem Grund wurde auch hier eine eigene Implementierung entwickelt, die der oben beschriebenen Vorgehensweise folgt und auf der verwendeten Implementierung des 2-opt Verfahrens beruht. Die Validierung dieser Implementierung wurde in Analogie zur Validierung der Prioritätsregeln erfolgreich auf Basis von Stichproben während der Simulationsstudie durchgeführt.

Integrierte Planung - MSDI

Im Rahmen der Evaluierung wurde das in dieser Arbeit entwickelte MSDI-Verfahren in einem Programm softwaretechnisch umgesetzt. Die zuvor beschriebenen Implementierungen der verwendeten Methoden kommen sowohl bei den Vergleichsverfahren als auch im Rahmen des MSDI-Verfahrens zur Anwendung. Diese Methoden wurden zur Ermittlung von Teilergebnissen als Funktionen implementiert und werden an den entsprechenden Stellen des Programms aufgerufen. In der Abbildung 30 ist das Ablaufdiagramm des MSDI-Verfahrens dargestellt. Die verwendeten Methoden wurden in dieser Abbildung farblich hinterlegt. Als Eingangsgrößen dienen die in den Abschnitten 6.1 und 6.2 beschriebenen Struktur- und Prozessparameter. Eine Validierung des gesamten Verfahrens ist auf Grund der hier erfolgten Neuentwicklung nicht möglich. Deshalb kommt der oben beschriebenen Validierung der verwendeten Methoden sowohl als Vergleichsverfahren als auch als ein Bestandteil des MSDI-Verfahrens eine besondere Bedeutung zu.

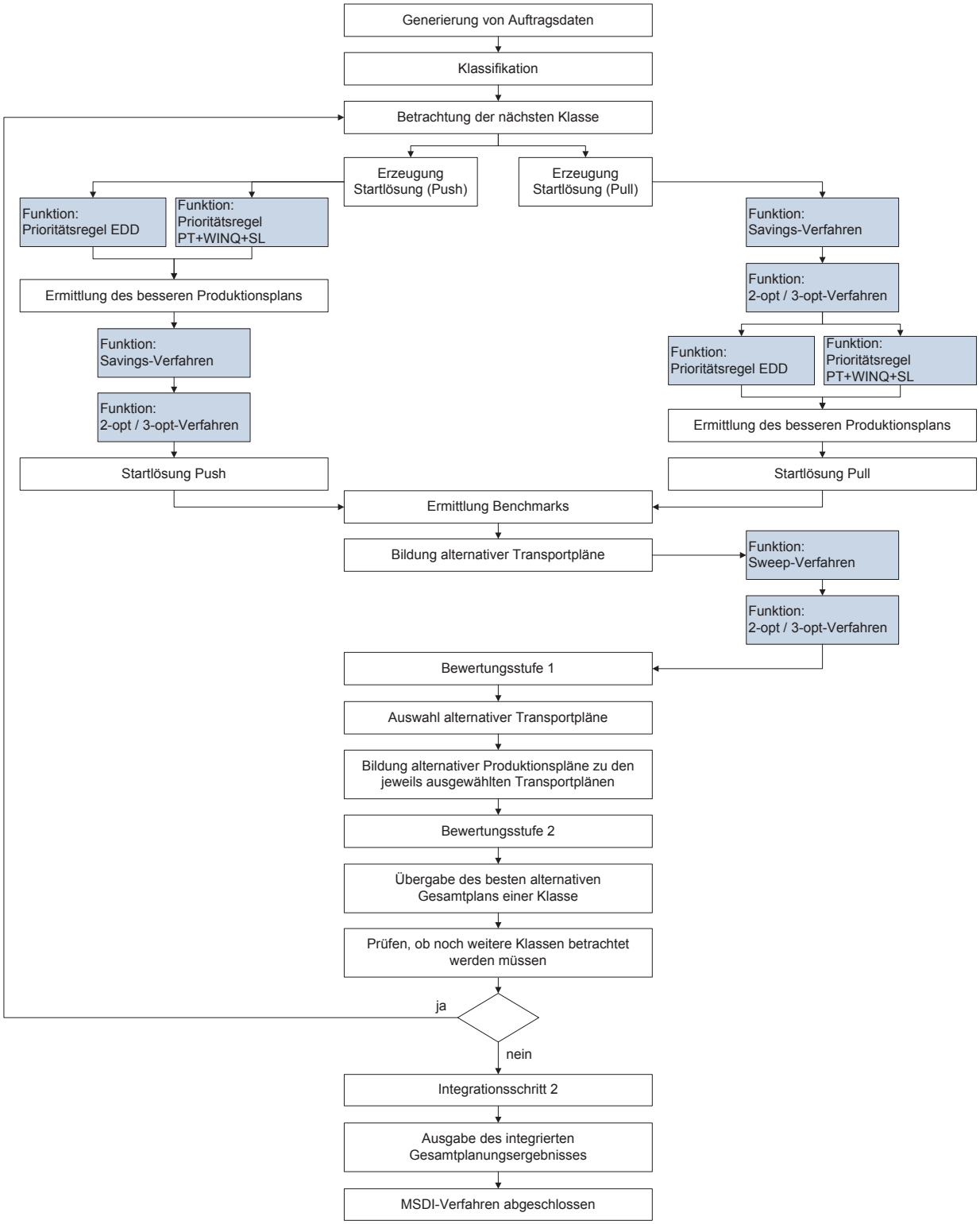


Abbildung 30: Ablaufdiagramm des MSDI-Lösungsverfahrens

6.6 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationsstudie zunächst für die einzelnen Varianten vorgestellt und interpretiert. Anschließend erfolgt in einer Zusammenfassung eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse aus den einzelnen Varianten, eine Sensitivitätsanalyse und die Identifizierung von Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Parametereinstellungen. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Simulationsstudie einschließlich der Angabe des Standardfehlers als Maß für die statistische Signifikanz findet sich in Anhang 6.

6.6.1 Variante 1: 80% Auslastung der Produktionskapazitäten

Kriterium: Anzahl der besten Gesamtplanungsergebnisse

Die Simulationsstudie dieser Variante hat ergeben, dass bei der gewählten Anzahl von 1000 Replikationen sowohl die nach dem Push- als auch die nach dem Pull-Prinzip arbeitenden Verfahren nur in einer geringen Anzahl der Fälle das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis gemessen am Kriterium der Gesamtkosten ermitteln konnten. In lediglich vier bzw. 48 Replikationen konnten durch das Push-EDD bzw. Push-PT+WinQ+SL Verfahren die besten Ergebnisse ermittelt werden. Mit Hilfe des Pull-Savings Verfahren konnte in 39 Fällen das beste integrierte Gesamtergebnis bestimmen. Das MSDI-Lösungsverfahren dominiert alle anderen Verfahren deutlich, da es in 909 Fällen und damit in der überwiegenden Anzahl der Fälle das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis erzielen konnte. Die Abbildung 31 stellt diese Häufigkeiten grafisch dar.

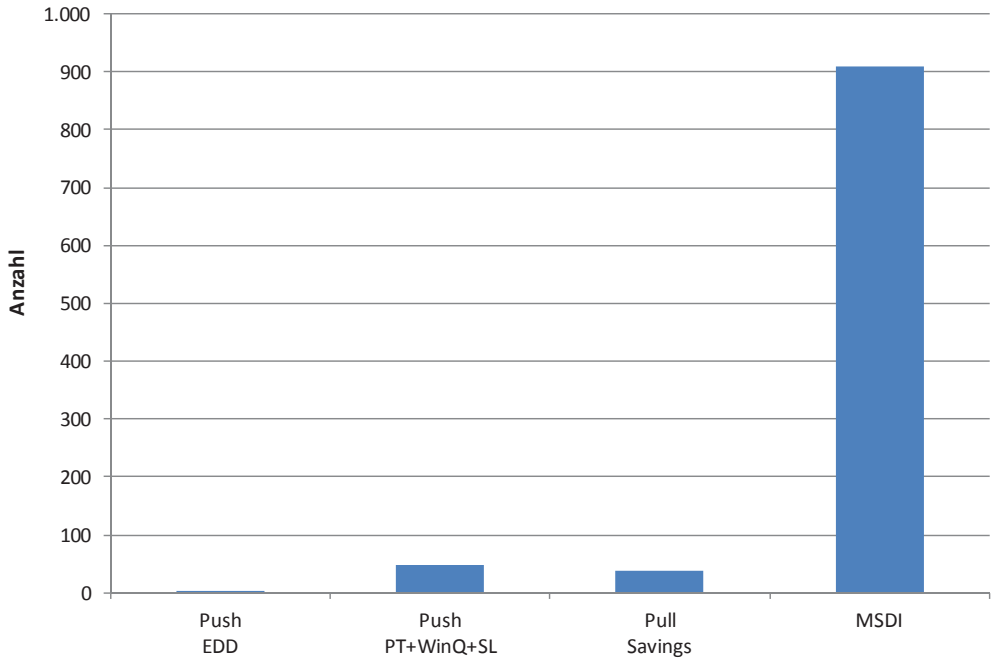


Abbildung 31: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 1

Kriterium: Gesamtkosten der Warteschlange

Bei den durch die Verweildauer in einer Warteschlange entstandenen durchschnittlichen Gesamtkosten aller Replikationen weist das MSDI-Lösungsverfahren mit etwa 27.000GE den geringsten Wert auf. Innerhalb der nach dem Push-Prinzip arbeitenden Verfahren ergibt sich mit einem Wert von etwa 30.450GE bei dem Push-EDD Verfahren und mit einem Wert von 28.050GE bei

dem Push-PT+WinQ+SL Verfahren ein deutlicher Unterschied zwischen den prioritätsbasierten Verfahren. Bei der Anwendung des Pull-Savings Verfahrens entstehen mit einem Wert von etwa 30.650GE die höchsten Kosten, die im Überblick und mit Angabe des Standardfehlers als Maß für die Signifikanz in der Abbildung 32 dargestellt sind.

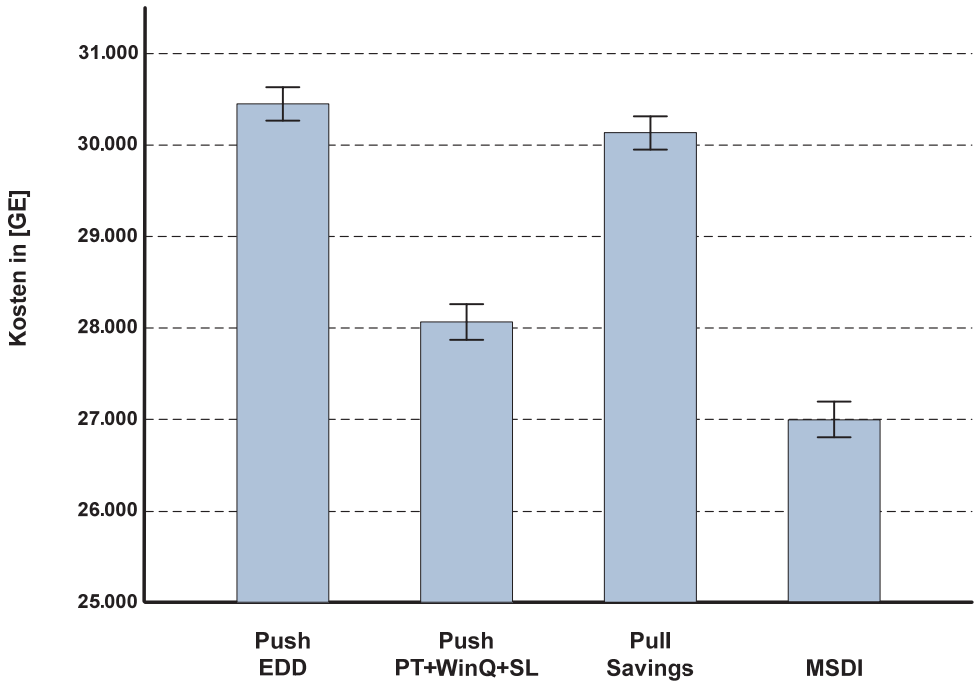


Abbildung 32: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 1

Kriterium: Gesamtkosten des Zwischenspeichers

Wie aus der Abbildung 33 hervorgeht, liegen die durchschnittlichen Gesamtkosten für die Nutzung des Zwischenspeichers bei den Vergleichsverfahren auf einem ähnlichen Niveau von etwa 22.550GE. Durch die Anwendung des MSDI-Lösungsverfahrens können diese Kosten auf einen Wert von 20.900GE reduziert werden.

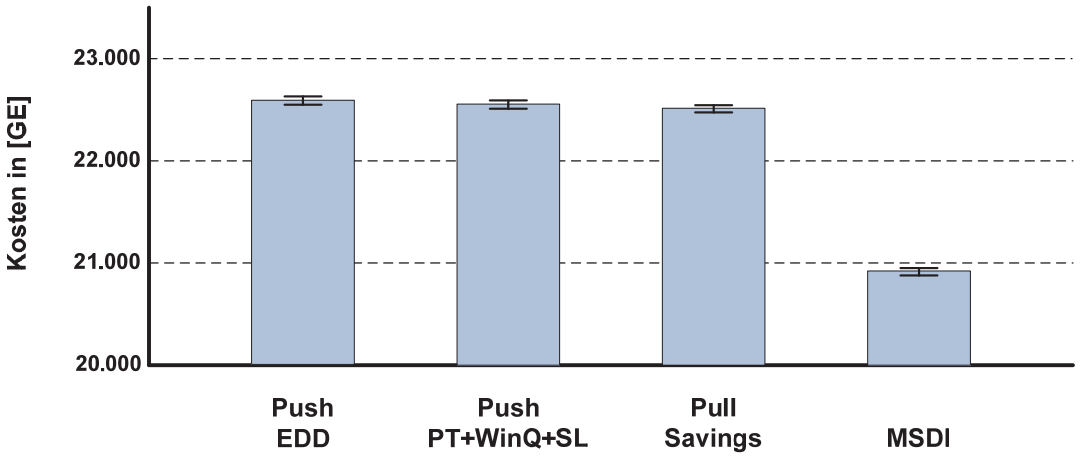


Abbildung 33: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 1

Kriterium: variable Gesamtkosten der Produktion

Die durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion, die in Abbildung 34 dargestellt sind, ergeben sich aus der Summe der variablen Kosten, also der Kosten, die für die Nutzung der Warteschlangen sowie des Zwischenspeichers entstehen. Darüber hinaus werden bereits an dieser Stelle die Kosten für durch die Produktion verursachte Verspätungen berücksichtigt. Aus der Abbildung 34 kann entnommen werden, dass die beiden nach dem Push-Prinzip arbeitenden Verfahren erwartungsgemäß die geringsten durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion aufweisen, da diese beiden Verfahren für das Teilproblem der Produktionsplanung entwickelt wurden. Das Vergleichsverfahren Pull-Savings liefert ebenfalls erwartungsgemäß den höchsten Wert für die durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion, da bei diesem Verfahren das Teilproblem des Transport das Teilproblem der Produktion dominiert. Das MSDI-Lösungsverfahren liegt mit einem Wert von etwa 59.650GE zwischen den Werten der Vergleichsverfahren. Dies ist dadurch zu erklären, dass beim Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens der Fokus auf einer Betrachtung des integrierten Gesamtproblems liegt und nicht auf der Optimierung des Teilproblems der Produktion, wie es bei den nach dem Push-Vergleichsverfahren der Fall ist.

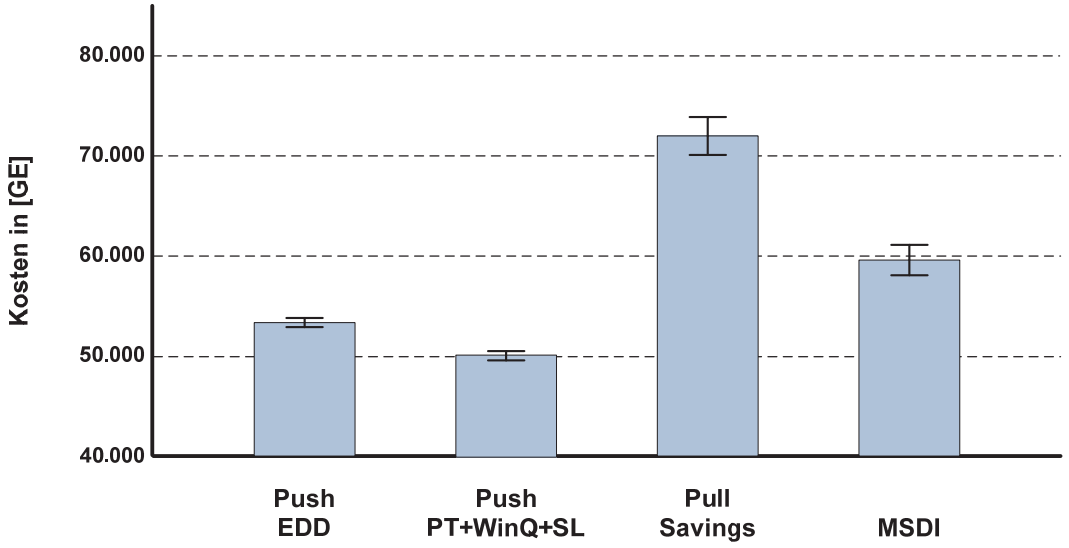


Abbildung 34: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 1

Kriterium: Gesamtkosten der Transporte

Die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports aller Replikationen ergeben sich aus dem Mittelwert der monetär bewerteten Gesamtentfernungen, die in jeder Replikation zurückgelegt werden, um alle Aufträge zu den entsprechenden Knoten zu liefern. Folglich kommt der Transportplanung eine entscheidende Rolle bei der Minimierung der zurückgelegten Gesamtentfernung zu. Aus diesem Grund konnten mit dem transportorientierten Verfahren Pull-Savings erwartungsgemäß die geringsten Transportkosten ermittelt werden. Wie aus der Abbildung 35 ersichtlich wird, weisen die beiden produktionsorientierten Push-Verfahren im Gegensatz dazu sehr hohe Transportkosten auf. Die Transportkosten, die durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens hervorgerufen werden, liegen mit einem Wert von etwa 62.700GE nur geringfügig über den Kosten des Pull-Savings mit einem Wert von etwa 60.230GE. Diese geringe Differenz lässt sich dadurch erklären, dass bei dem Verfahren Pull-Savings die gesamte Auftragsmenge einer Klasse

für die Transportplanung herangezogen wird. Im Gegensatz dazu werden bei dem im MSDI-Lösungsverfahren implementierten Sweep-Verfahren nur die nach dem Polarwinkel nächsten Nachbarn bis zum Erreichen der Kapazitätsgrenzen des Transportfahrzeugs betrachtet. Darüber hinaus wurde das MSDI-Lösungsverfahren für eine integrierte Betrachtung zur Optimierung der Gesamtkosten entwickelt und konzentriert sich nicht auf die Optimierung eines Teilproblems.

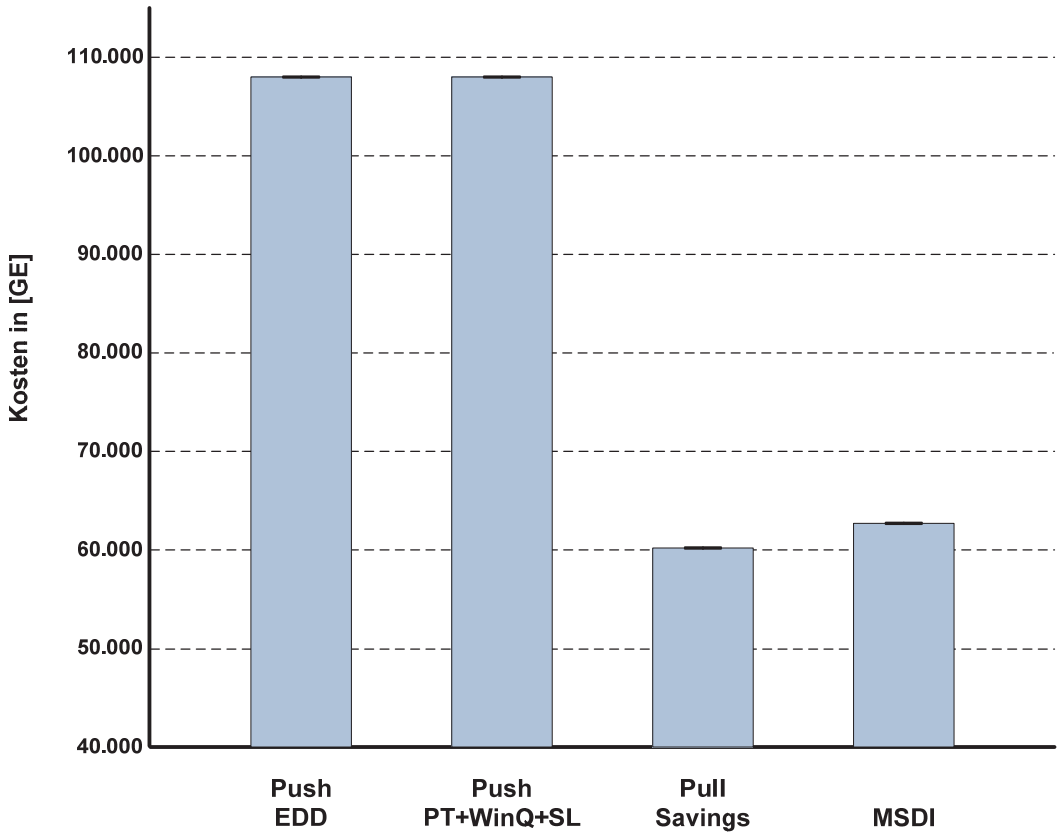


Abbildung 35: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 1

Kriterium: Gesamtkosten

Bei einem Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens ergeben sich mit einem Wert von etwa 159.400GE die geringsten durchschnittlichen Kosten für das integrierte Gesamtplanungsergebnis. Aus der Abbildung 36 kann entnommen werden, dass für das Pull-Savings Verfahren die durchschnittlichen Kosten einen Wert von etwa 169.300GE annehmen und die Push-Vergleichsverfahren Kosten von mehr als 195.000GE verursachen. Damit erfordern die Vergleichsverfahren einen finanziellen Mehraufwand in Höhe von 24,6% beim Push-EDD Verfahren und in Höhe von 23% beim Push-PT+WinQ+SL Verfahren verglichen mit dem MSDI-Lösungsverfahren. Bei der Anwendung des Pull-Savings Verfahren fallen Mehrkosten gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren in Höhe von 6,2% an.

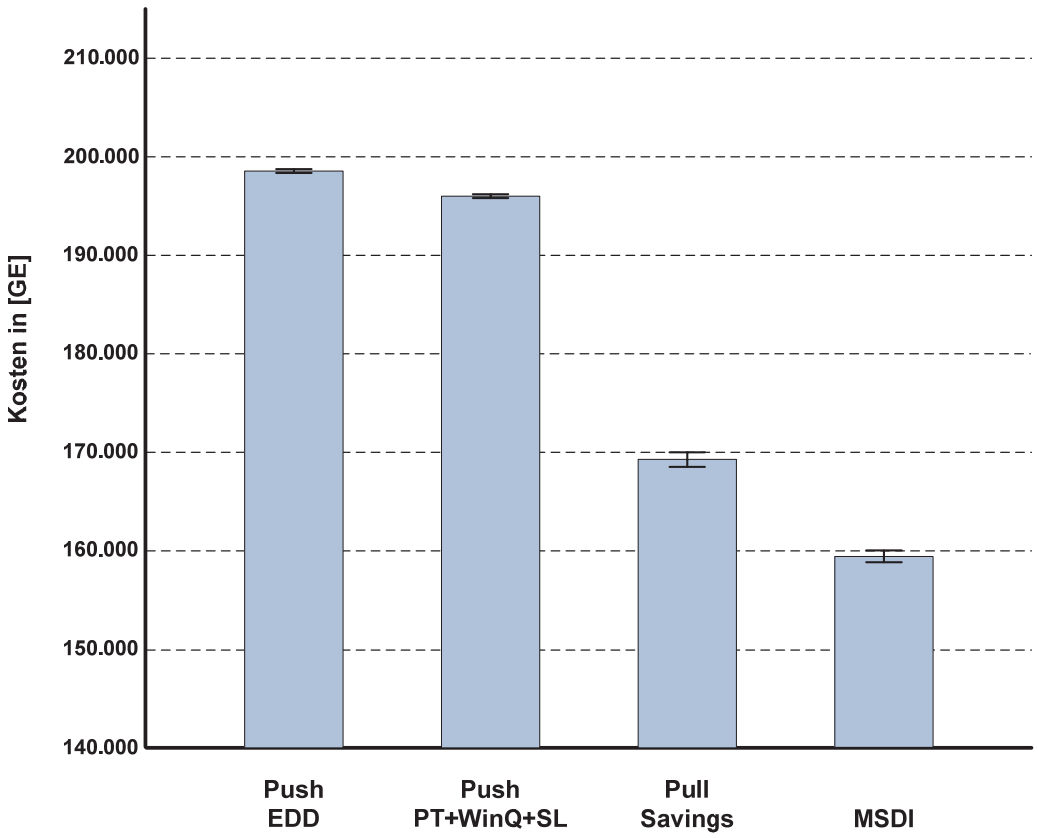


Abbildung 36: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 1

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass durch das MSDI-Lösungsverfahren nicht die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten für das jeweilige Teilproblem erzielt werden konnten. Durch die Funktionsweise des Verfahrens ergibt sich dennoch der geringste Wert für durchschnittlichen Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise. Die Abbildung 37 stellt die Kosten für die jeweiligen Teilprobleme gegenüber wobei im oberen Teil der Abbildung die durchschnittlichen Gesamtkosten der Produktion und im unteren Teil die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports dargestellt sind. Die gestrichelte Linie kennzeichnet das Niveau der durchschnittlichen Gesamtkosten des jeweiligen Teilproblems, die durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens entstehen. Deutlich ist zu erkennen, dass dieses Kostenniveau zwischen den oberen und unteren Grenzen liegt.

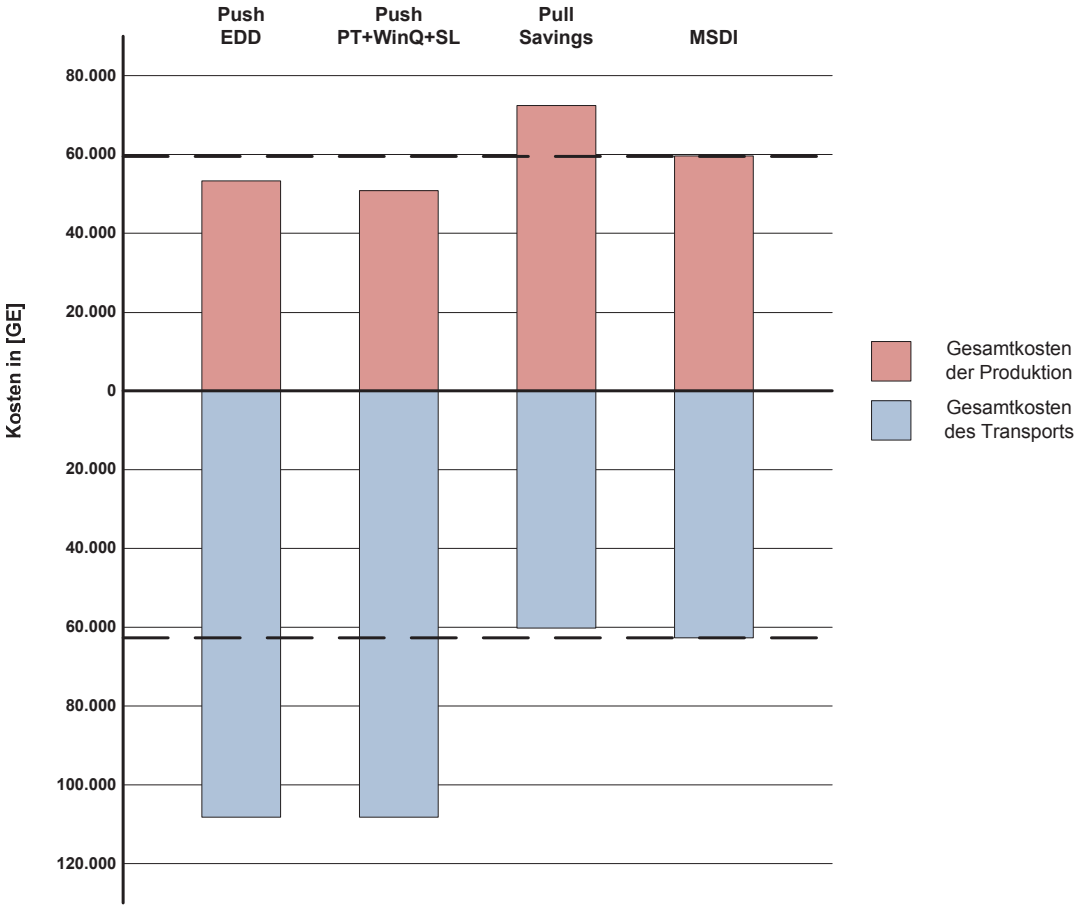


Abbildung 37: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 1

6.6.2 Variante 2: 85% Auslastung der Produktionskapazitäten

Kriterium: Anzahl der besten Gesamtplanungsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen bei dieser Variante ein ähnliches Bild wie bei der Variante 1. Alle Vergleichsverfahren konnten nur in sehr wenigen Fällen das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis gemessen am Kriterium der Gesamtkosten erzielen. Bei einer bzw. bei 37 Replikationen konnten durch das Push-EDD bzw. Push-PT+WinQ+SL Verfahren die besten Ergebnisse ermittelt werden. Das Pull-Savings Verfahren liefert in 42 von insgesamt 1.000 Replikationen dieser Variante das beste integrierte Gesamtergebnis und stellt damit bereits den Spitzenwert bei den Vergleichsverfahren dar. Auch in Variante 2 dominiert somit das MSDI-Lösungsverfahren alle anderen Verfahren deutlich. Bei 920 Replikationen konnte das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis erzielt werden. Die Abbildung 38 stellt diese Häufigkeiten grafisch dar.

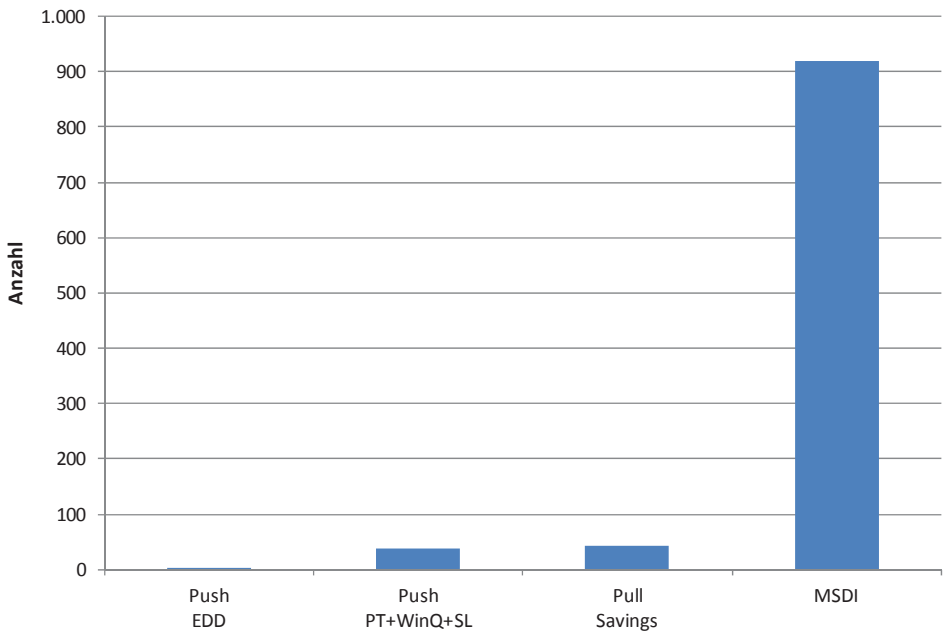


Abbildung 38: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 2

Kriterium: Gesamtkosten der Warteschlange

Auch bei den durch die Verweildauer in einer Warteschlange entstanden durchschnittlichen Gesamtkosten stellen sich ähnliche Ergebnisse wie bei der Variante 1 ein. Das MSDI-Lösungsverfahren weist mit etwa 26.900GE den geringsten Wert auf. Innerhalb der Push-Verfahren verursacht das Push-EDD die höheren Kosten für die Nutzung der Warteschlangen. In Analogie zur Variante 1 entfallen auf das Pull-Savings Verfahren auch bei dieser Variante die höchsten Kosten. Die Abbildung 39 stellt die anfallenden durchschnittlichen Gesamtkosten für die Nutzung der Warteschlangen dar.

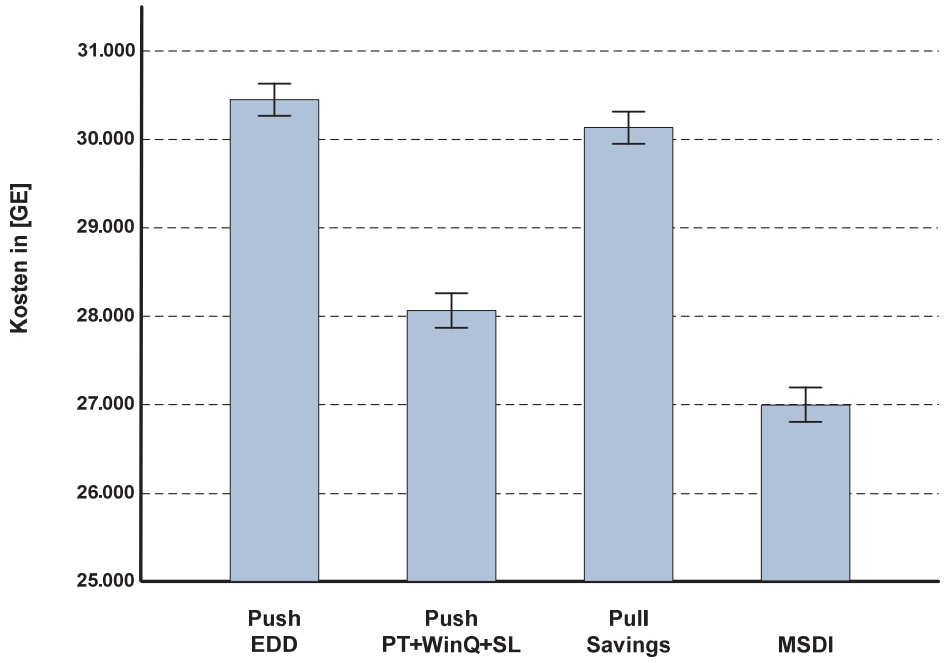


Abbildung 39: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 2

Kriterium: Gesamtkosten des Zwischenspeichers

In der Abbildung 40 ist erkennbar, dass durch die Anwendung der Vergleichsverfahren ähnliche durchschnittliche Gesamtkosten für die Nutzung des Zwischenspeichers in Höhe von etwa 22.600GE anfallen. Durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens fallen hingegen geringe Kosten in Höhe von etwa 20.900GE an.

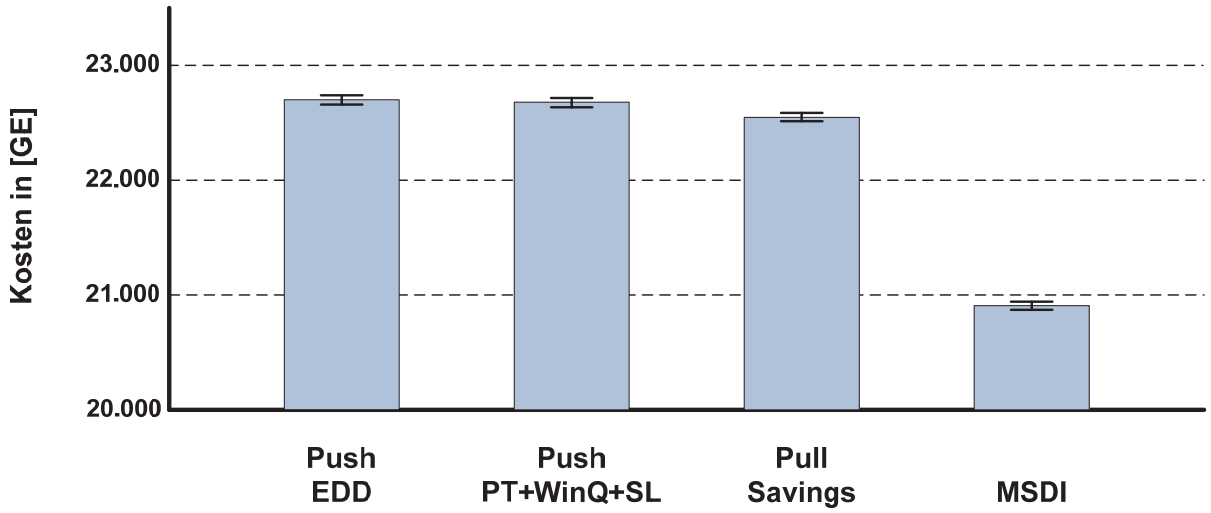


Abbildung 40: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 2

Kriterium: variable Gesamtkosten der Produktion

Die in der Variante 2 ermittelten durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion sind in Abbildung 41 dargestellt. Auch für dieses Kriterium ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Variante 1. Die beiden nach dem Push-Prinzip arbeitenden Verfahren weisen erwartungsgemäß die geringsten durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion auf und das Vergleichsverfahren Pull-Savings liefert ebenfalls erwartungsgemäß den höchsten Wert. Das MSDI-Lösungsverfahren liegt mit einem Wert von etwa 58.000GE erneut zwischen den Werten der Vergleichsverfahren.

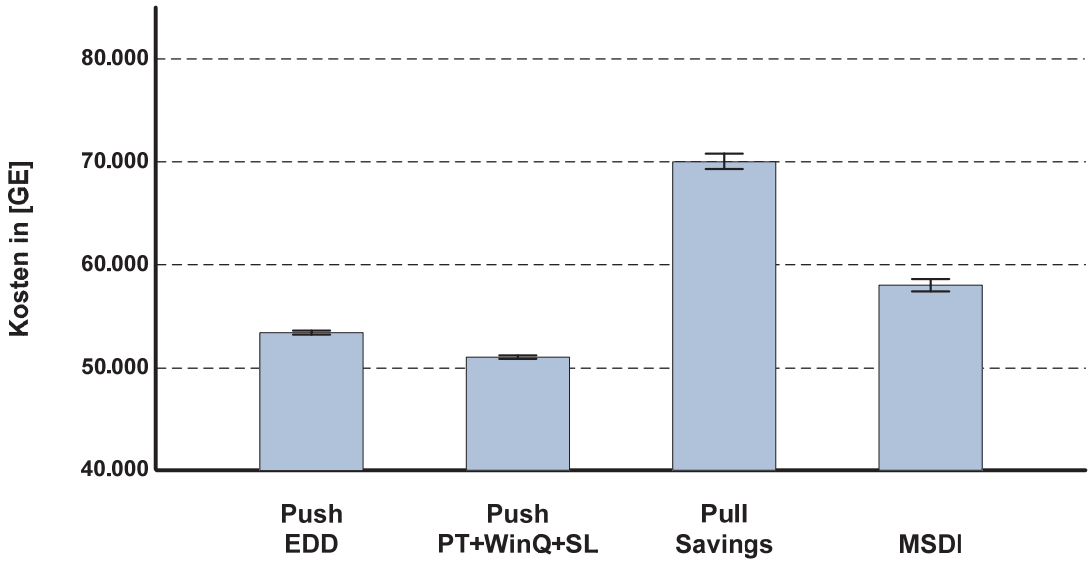


Abbildung 41: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 2

Kriterium: Gesamtkosten der Transporte

Für die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports ergibt sich entsprechend der Abbildung 42 ein Bild, das nahezu mit dem der Variante 1 identisch ist. Beim transportorientierten Pull-Savings Verfahren ergeben sich die geringsten Transportkosten wohingegen die beiden produktionsorientierten Push-Verfahren sehr hohe Transportkosten aufweisen. Die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports fallen beim MSDI-Lösungsverfahrens nur geringfügig höher aus als die Kosten des Pull-Savings Verfahrens.

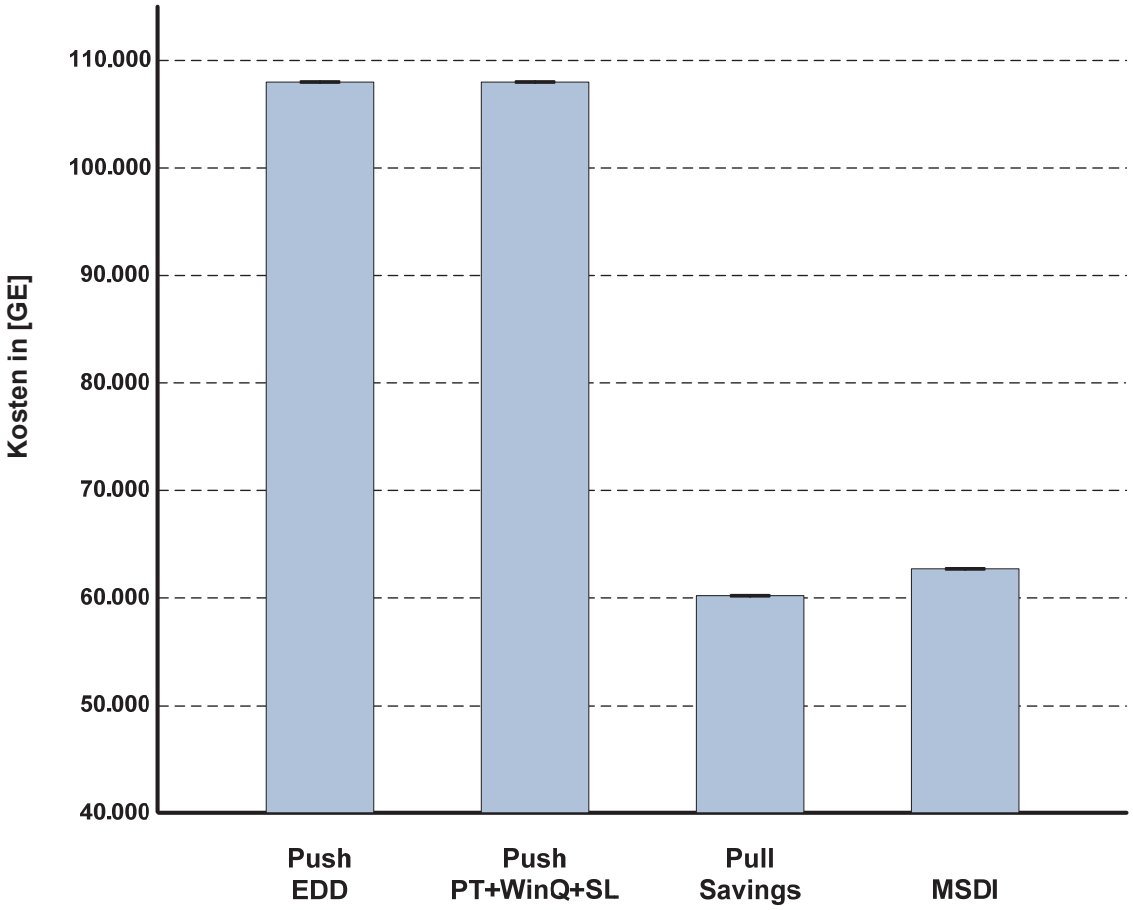


Abbildung 42: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 2

Kriterium: Gesamtkosten

Hinsichtlich der durchschnittlichen Gesamtkosten ergibt sich für die Push-Verfahren keine Veränderung im Vergleich zur Variante 1. Sogar die einzelnen Werte für die durchschnittlichen Gesamtkosten sind nahezu identisch. Für das Pull-Savings Verfahren und das MSDI-Lösungsverfahren ergeben sich im Vergleich zur Variante 1 eine weitere Reduzierung der durchschnittlichen Gesamtkosten um jeweils etwa 2.000GE. Diese Verbesserung kann mit einer verbesserten Auslastung der Transportfahrzeuge im Vergleich zur Variante 1 erklärt werden. Dadurch das durch eine erhöhte Maschinenauslastung in der gleichen Zeit mehr Aufträge die Produktion durchlaufen, stehen auch mehr Aufträge für die Transportplanung zur Verfügung. Diese ist dadurch in der Lage, aus einem größeren Auftragspool verbesserte Touren hinsichtlich der Entfernung und der Auslastung der Transportfahrzeuge zu bilden.

Aus den in der Simulationsstudie ermittelten und in der Abbildung 43 visualisierten Werten wird ersichtlich, dass bei einer Anwendung der Vergleichsverfahren auch bei dieser Variante ein finanzieller Mehraufwand verglichen mit dem MSDI-Lösungsverfahren entsteht. Beim Push-EDD Verfahren beläuft sich dieser auf 26% und beim Push-PT+WinQ+SL Verfahren auf 24,4%. Bei der Anwendung des Pull-Savings Verfahren fallen Mehrkosten gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren in Höhe von 6% an.

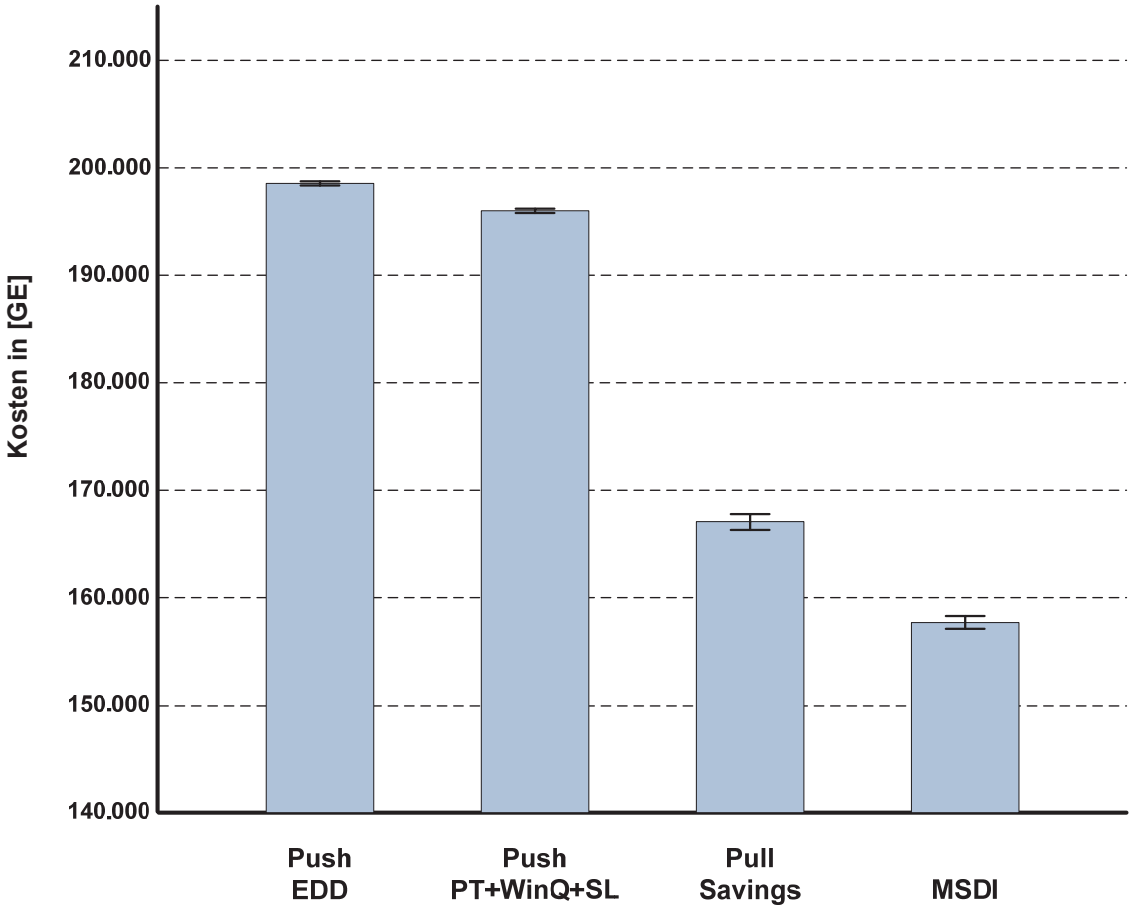


Abbildung 43: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 2

In Analogie zu den Ergebnissen der Variante 1 kann erneut festgestellt werden, dass durch das MSDI-Lösungsverfahren nicht die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten für das jeweilige Teilproblem erzielt werden konnten. Bei integrierter Betrachtungsweise ergibt sich dennoch der geringste Wert für durchschnittlichen Gesamtkosten für dieses Verfahrens. In der Abbildung 44 sind die durchschnittlichen Gesamtkosten für die jeweiligen Teilprobleme und das Niveau der durchschnittlichen Gesamtkosten des MSDI-Lösungsverfahrens durch die gestrichelte Linie dargestellt. Auch bei dieser Variante liegt dieses Kostenniveau zwischen den oberen und unteren Grenzen.

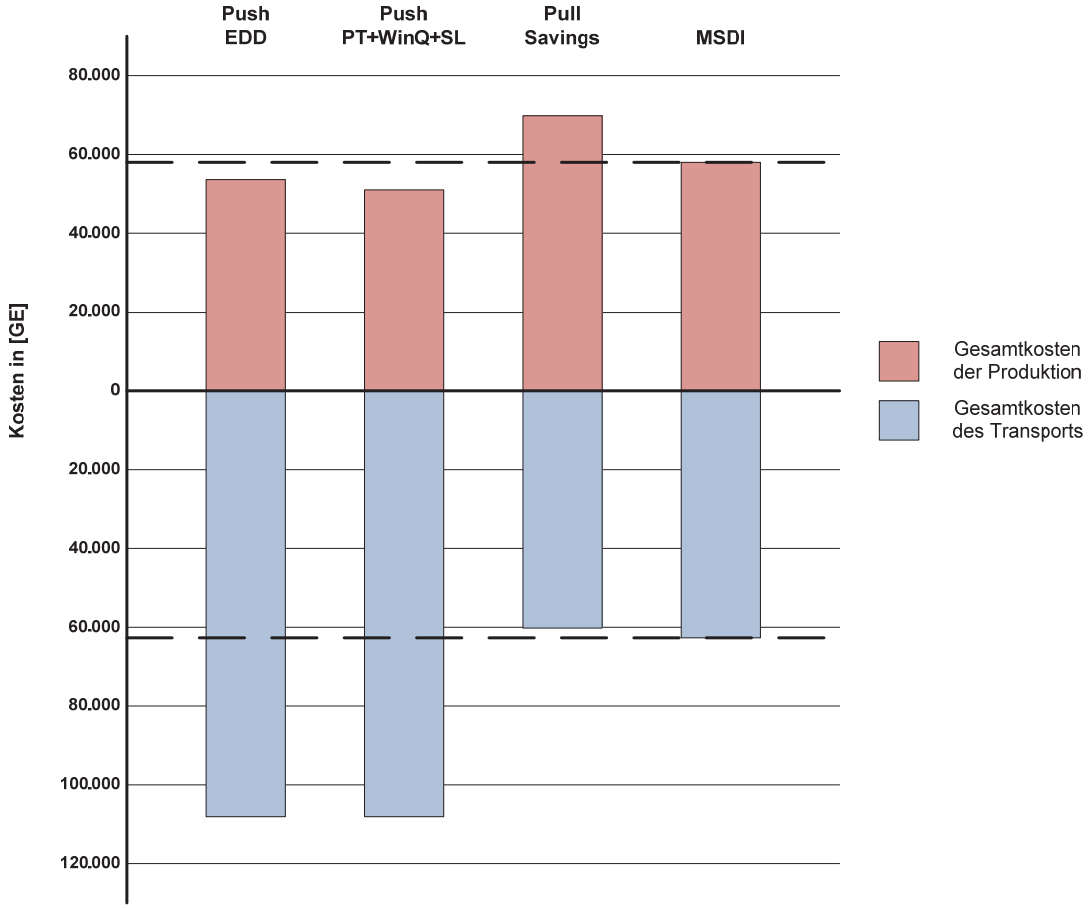


Abbildung 44: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 2

6.6.3 Variante 3: 90% Auslastung der Produktionskapazitäten

Kriterium: Anzahl der besten Gesamtplanungsergebnisse

Aus der Abbildung 45 ist erkennbar, dass das MSDI-Lösungsverfahren auch in dieser Variante allen anderen Vergleichsverfahren deutlich überlegen ist. In 85% der Fälle konnte mit Hilfe dieses Verfahrens das beste integrierte Gesamtergebnis erzielt werden. Im Gegensatz dazu konnten bei der Anwendung des Push-EDD bzw. Push-PT+WinQ+SL Verfahren bei drei bzw. bei 90 Replikationen die besten Ergebnisse ermittelt werden. Mit Hilfe des Pull-Savings Verfahren konnte in 55 Fällen das beste integrierte Gesamtergebnis bestimmen.

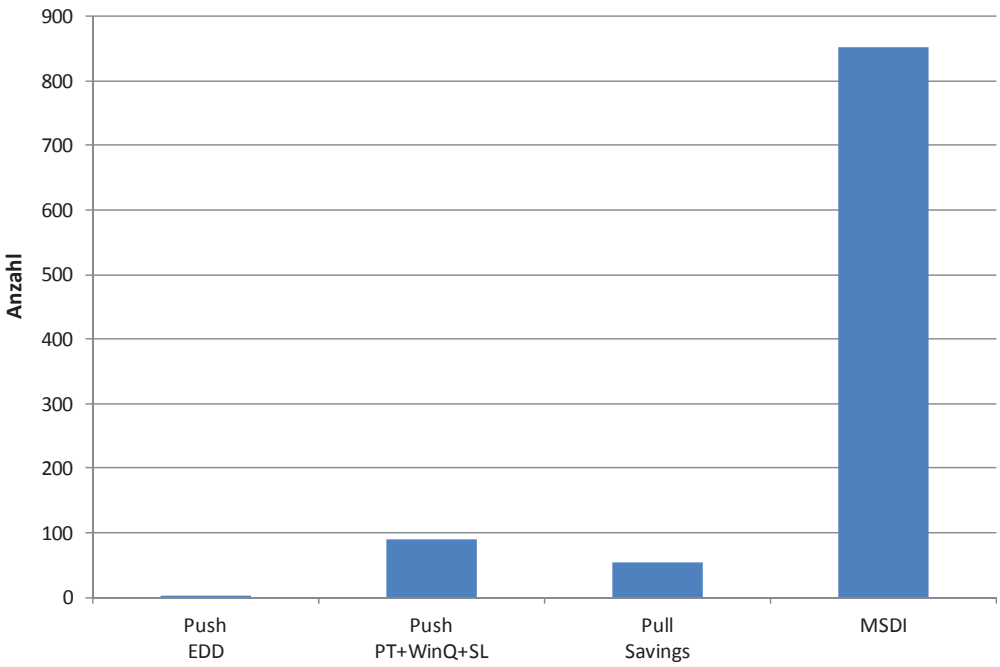


Abbildung 45: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 3

Kriterium: Gesamtkosten der Warteschlange

Wie bei den vorangegangen Varianten ergeben sich auch hier für das MSDI-Lösungsverfahren die geringsten durch die Verweildauer in einer Warteschlange entstanden durchschnittlichen Gesamtkosten. Diese belaufen sich auf etwa 33.830GE und sind in der Abbildung 46 dargestellt. Das beste der Vergleichsverfahren Push-PT+WinQ+SL weist im Vergleich dazu mit etwa 34.870GE einen um circa 3% höheren Wert auf. Die verbleibenden Vergleichsverfahren Push-EDD und Pull-Savings weisen jeweils einen um etwa 9,6% gesteigerten Wert auf.

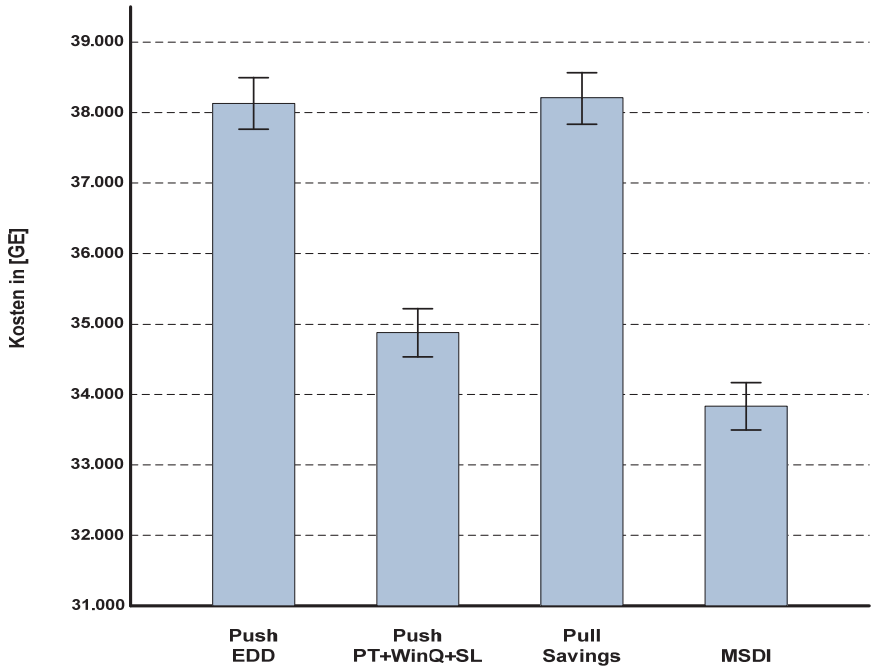


Abbildung 46: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 3

Kriterium: Gesamtkosten des Zwischenspeichers

Für die Nutzung des Zwischenspeichers entstehen bei Anwendung der Push-Vergleichsverfahren ähnliche durchschnittliche Gesamtkosten in Höhe von etwa 21.900GE. Durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens hingegen fallen geringfügig höhere Kosten als bei den Push-Vergleichsverfahren an. Die höchsten durchschnittlichen Gesamtkosten für den Zwischenspeicher entfallen auf das Pull-Savings Verfahren. Die Abbildung 47 stellt diese Kostensituation dar.

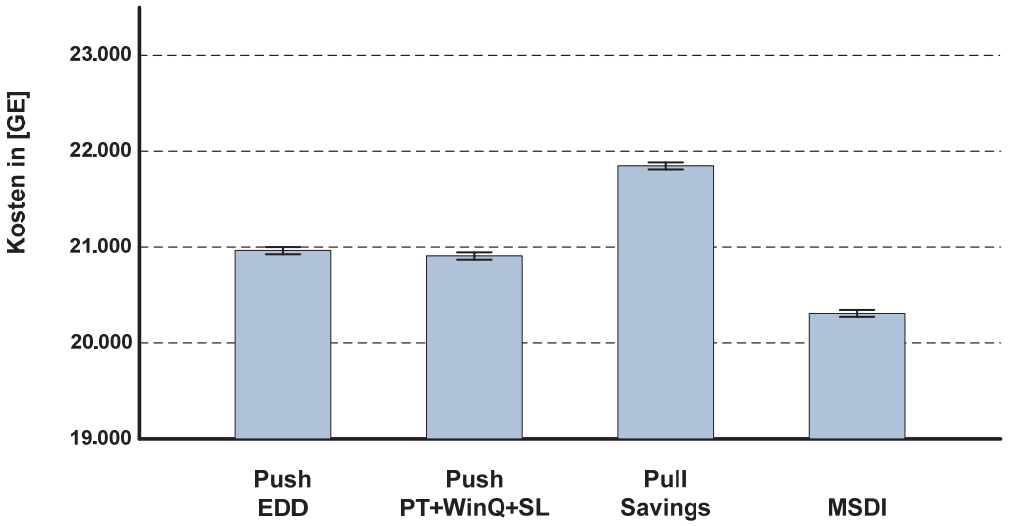


Abbildung 47: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 3

Kriterium: variable Gesamtkosten der Produktion

Die beiden Push-Verfahren weisen die besten Werte für dieses Kriterium der durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion auf. Die Kostendifferenz zwischen diesen beiden Verfahren beläuft sich auf etwa 3.600GE. Bei einem Einsatz des transportorientierten Pull-Savings Verfahrens hingegen entstehen durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion in Höhe von etwa 87.050GE. Das MSDI-Lösungsverfahren liegt mit einem Wert von etwa 72.000GE wiederum zwischen den Werten der Vergleichsverfahren, was auch in der nachfolgenden Abbildung 48 zu erkennen ist.

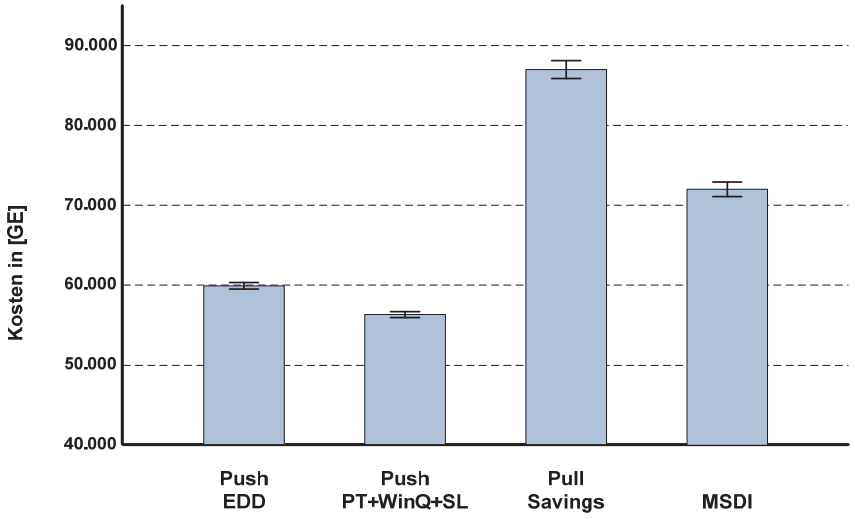


Abbildung 48: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 3

Kriterium: Gesamtkosten der Transporte

Auch bei diesem Kriterium findet sich eine fast identische Situation im Vergleich mit den vorherigen Varianten. Diese betrifft sowohl die Kostenverhältnisse untereinander als auch die absoluten Werte, die in der Abbildung 49 dargestellt sind. Die beiden produktionsorientierten Push-Verfahren verursachen mit etwa 108.100GE sehr hohe Transportkosten. Im Vergleich dazu ergeben sich mit einem Wert von etwa 58.500GE die geringsten Transportkosten beim transportorientierten Pull-Savings Verfahren. Die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports fallen beim MSDI-Lösungsverfahrens nur etwa 2.500 höher aus als die Kosten des Pull-Savings Verfahrens.

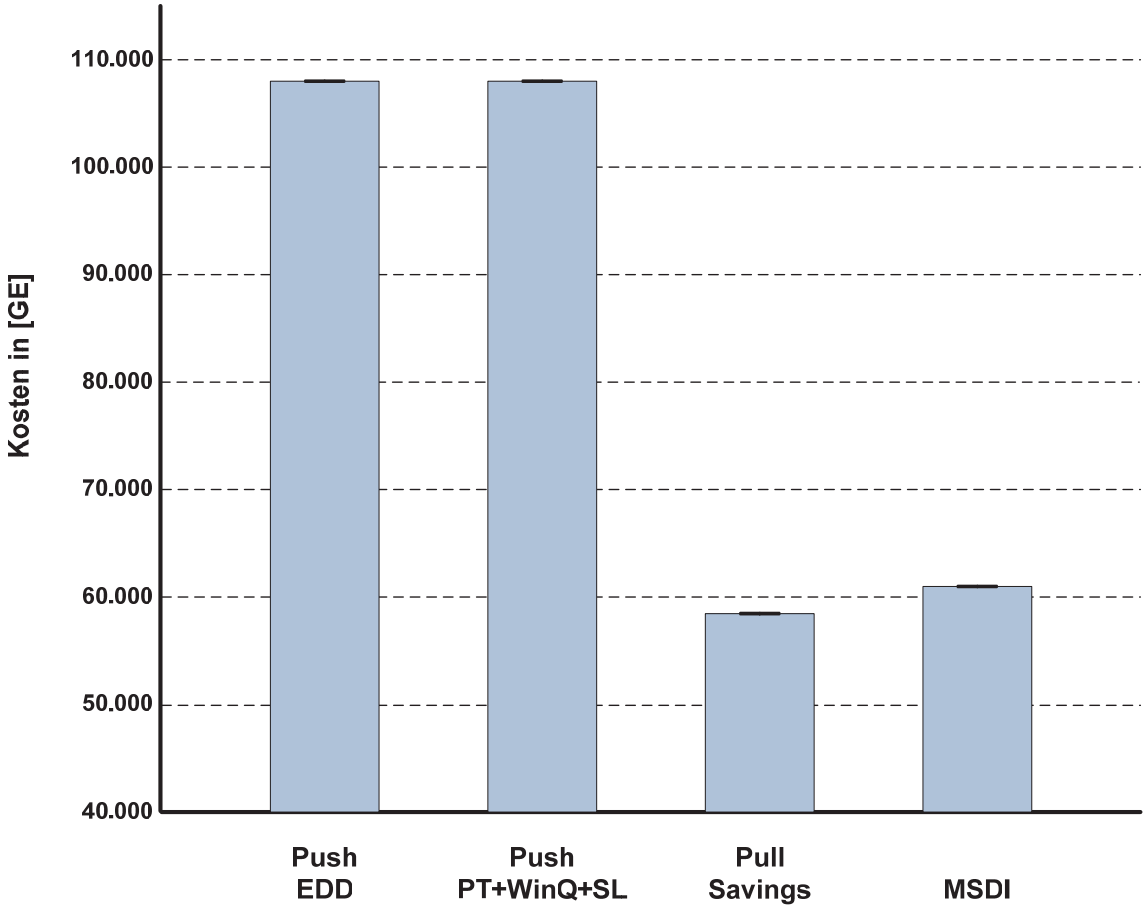


Abbildung 49: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 3

Kriterium: Gesamtkosten

Die beiden Push-Verfahren weisen die höchsten durchschnittlichen Gesamtkosten auf wohingegen das MSDI-Lösungsverfahren erneut integrierte Gesamtpläne ermittelt, die die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten erzeugen. Aus den ermittelten und in der Abbildung 50 visualisierten Werten wird ersichtlich, dass bei einer Anwendung der Vergleichsverfahren auch bei dieser Variante ein finanzieller Mehraufwand verglichen mit dem MSDI-Lösungsverfahren entsteht. Bei der Anwendung des besten Vergleichsverfahrens, also dem Pull-Savings Verfahren, fallen Mehrkosten gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren in Höhe von 7,3% an. Beim Push-EDD Verfahren beläuft sich dieser Mehraufwand im Vergleich zum MSDI-Lösungsverfahren auf 20,6% und beim Push-PT+WinQ+SL Verfahren auf 18,5%.

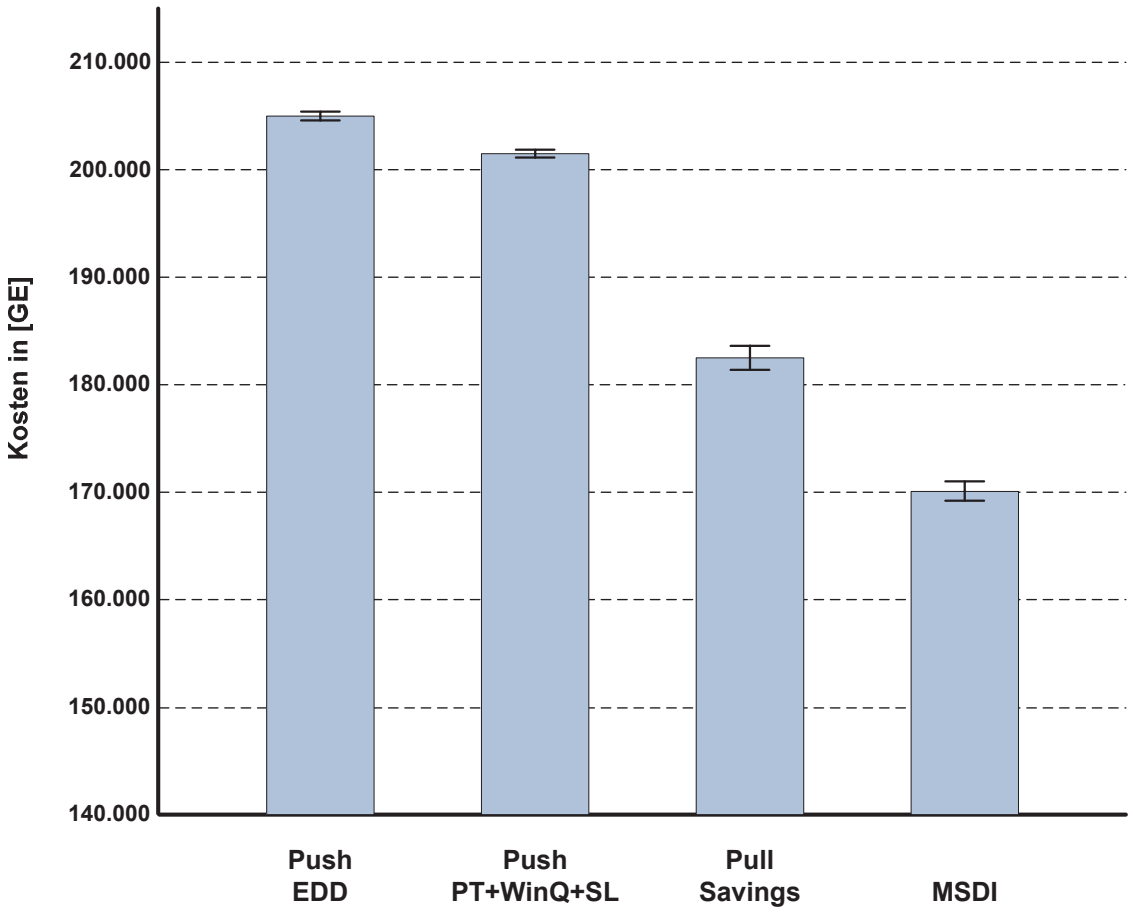


Abbildung 50: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 3

Auch die Ergebnisse für die Variante 3 zeigen, dass die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten für die einzelnen Teilprobleme nicht durch das MSDI-Lösungsverfahren erzielt werden. Erwartungsgemäß werden die besten Ergebnisse für das Teilproblem der Produktionsplanung durch die produktionsorientierten Push-Verfahren und für das Teilproblem der Transportplanung durch das Pull-Savings Verfahren ermittelt. Bei einer integrierten Betrachtungsweise ergibt sich jedoch der geringste Wert für durchschnittlichen Gesamtkosten durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens. In der Abbildung 51 sind wie bei den vorherigen Varianten die durchschnittlichen Gesamtkosten für die jeweiligen Teilprobleme und das Niveau der durchschnittlichen Gesamtkosten des MSDI-Lösungsverfahrens durch die gestrichelte Linie dargestellt.

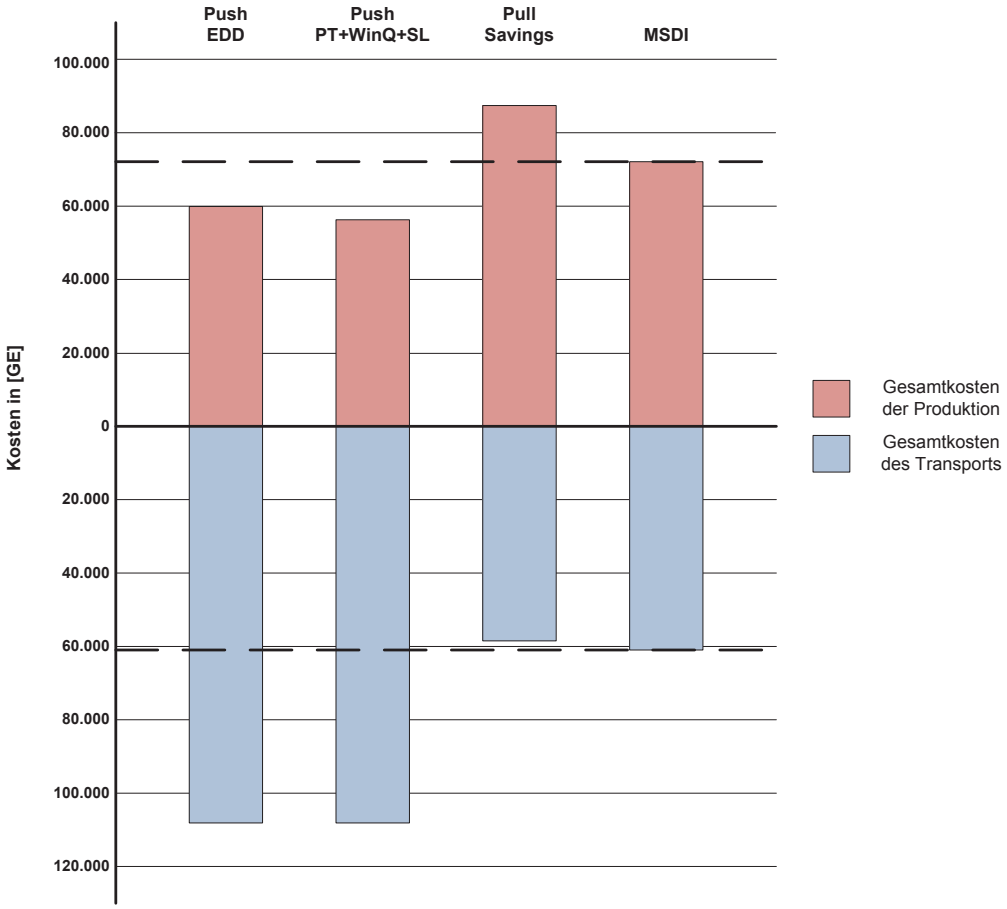


Abbildung 51: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 3

6.6.4 Variante 4: 95% Auslastung der Produktionskapazitäten

Kriterium: Anzahl der besten Gesamtplanungsergebnisse

Die Abbildung 52 zeigt, dass in 77% der Fälle durch das MSDI-Lösungsverfahren das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis erzielt werden konnte. Das Push-PT+WinQ+SL Verfahren stellt das beste der Vergleichsverfahren dar und konnte in 172 Fällen von insgesamt 1000 Fällen das beste Ergebnis ermitteln. Das Pull-Savings Verfahren und das Push-EDD bestätigen die Ergebnisse aus den vorherigen Varianten.

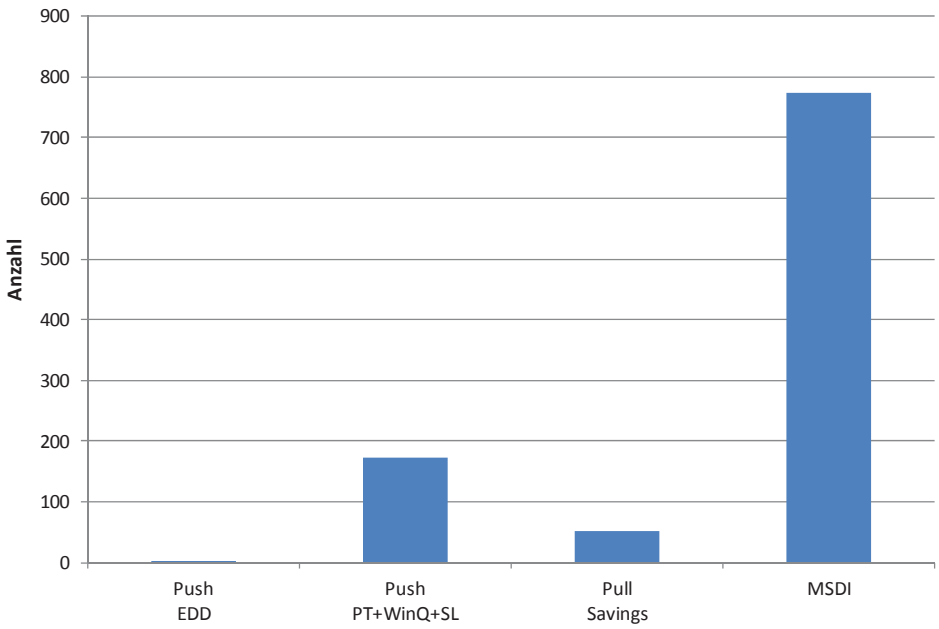


Abbildung 52: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in Variante 4

Kriterium: Gesamtkosten der Warteschlange

Für das MSDI-Lösungsverfahren ergeben sich mit einem Wert von etwa 48.760GE die geringsten durch die Verweildauer in einer Warteschlange entstanden durchschnittlichen Gesamtkosten. Weiterhin wird aus der Abbildung 53 ersichtlich, dass das Push-PT+WinQ+SL Verfahren das beste der Vergleichsverfahren ist und mit etwa 49.260GE nur einen um circa 1% höheren Wert aufweist. Bei den beiden anderen Vergleichsverfahren Push-EDD und Pull-Savings hingegen entstehen durch die Nutzung der Warteschlangen jeweils etwa 10% höhere Kosten.

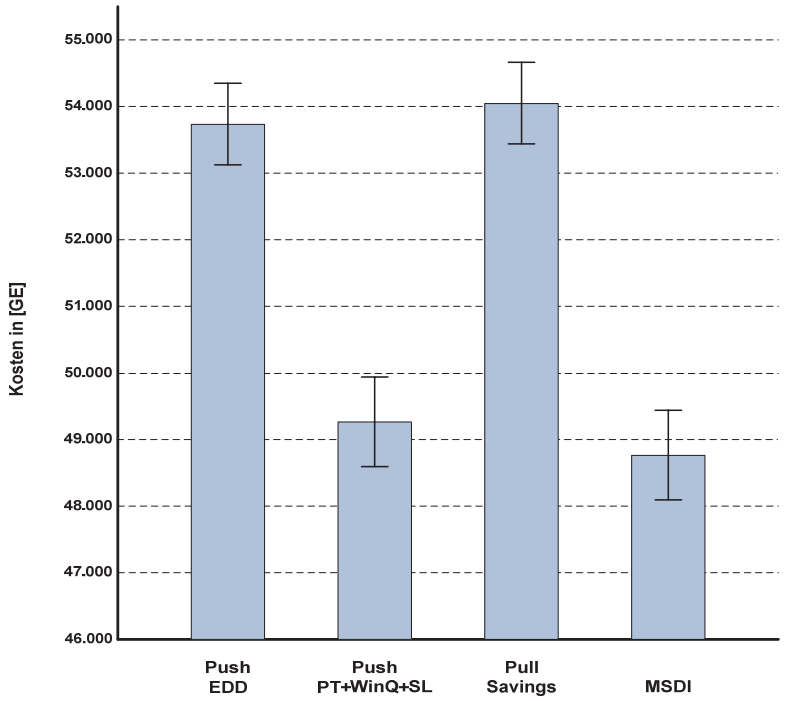


Abbildung 53: Durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange in Variante 4

Kriterium: Gesamtkosten des Zwischenspeichers

Wie in der Abbildung 54 zu erkennen ist, fallen für die Push-Verfahren mit jeweils etwa 19.500GE die geringsten durchschnittliche Gesamtkosten für die Nutzung des Zwischenspeichers an. Im Gegensatz dazu entstehen durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens Kosten in Höhe von etwa 21.820GE. Der schlechteste Wert entsteht bei der Anwendung des Pull-Savings Vefahrens.

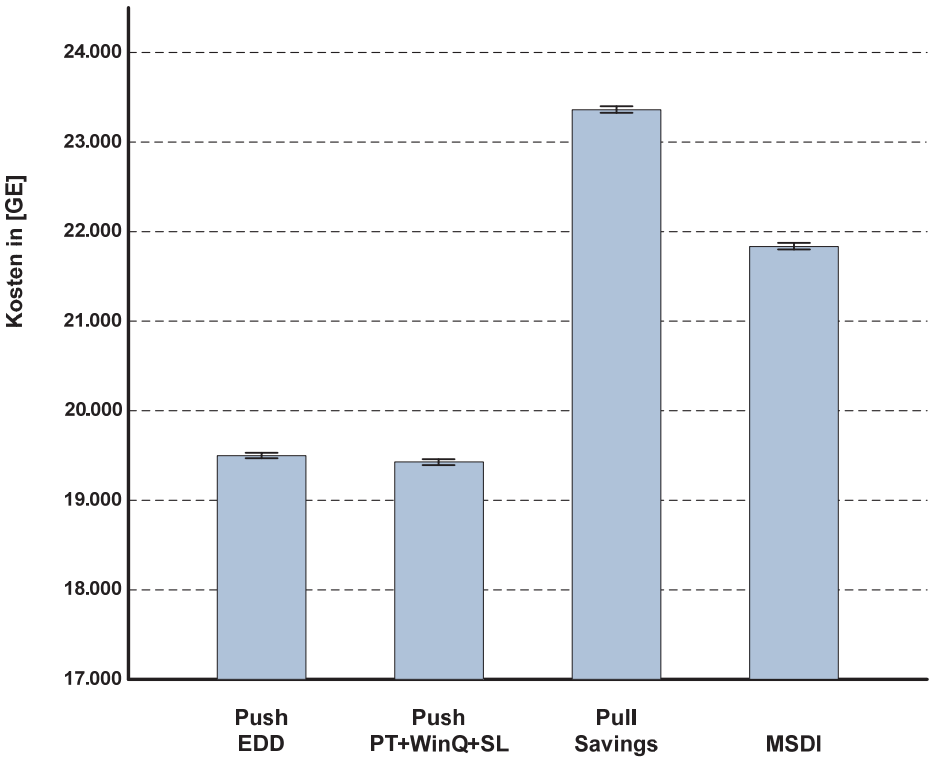


Abbildung 54: Durchschnittliche Gesamtkosten des Zwischenspeichers in Variante 4

Kriterium: variable Gesamtkosten der Produktion

Wie bei den vorherigen Varianten ergeben sich für die beiden Push-Verfahren die besten Werte für die durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion. Im Gegensatz zur vorherigen Variante beläuft sich der Kostenunterschied zwischen diesen beiden Verfahren auf etwa 5.000GE. Bei einem Einsatz des transportorientierten Pull-Savings Verfahrens hingegen entstehen durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion in Höhe von etwa 114.800GE. Erwartungsgemäß liegt das MSDI-Lösungsverfahren mit einem Wert von etwa 96.640GE erneut zwischen den Werten der Vergleichsverfahren, was auch in der nachfolgenden Abbildung 55 zu erkennen ist.

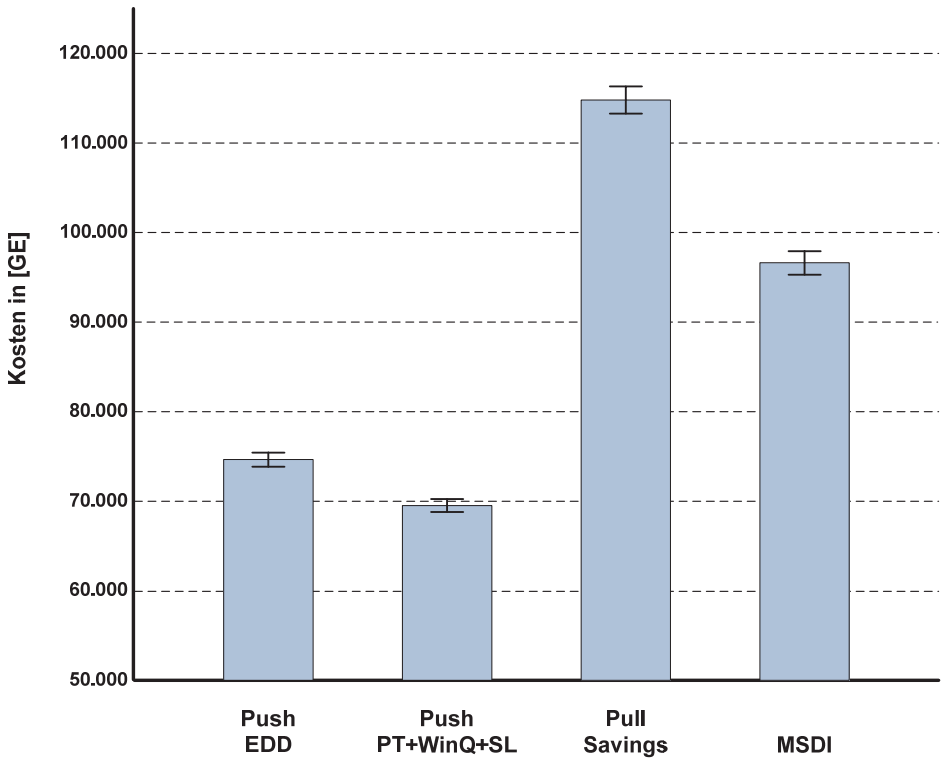


Abbildung 55: Durchschnittliche variable Gesamtkosten der Produktion in Variante 4

Kriterium: Gesamtkosten der Transporte

Entsprechend der in der Abbildung 56 dargestellten Ergebnisse der Simulationsstudie ergibt sich für dieses Kriterium eine fast identische Situation im Vergleich mit den vorherigen Varianten. Diese betrifft sowohl die Kostenverhältnisse untereinander als auch die absoluten Werte. Die beiden produktionsorientierten Push-Verfahren verursachen mit jeweils etwa 108.140GE sehr hohe Transportkosten. Im Gegensatz dazu entfallen auf das transportorientierte Pull-Savings Verfahren die geringsten Kosten mit einer Höhe von etwa 56.770GE. Auch bei dieser Variante liegen die durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports bei der Anwendung des MSDI-Lösungsverfahrens erwartungsgemäß zwischen den Werten der Vergleichsverfahren.

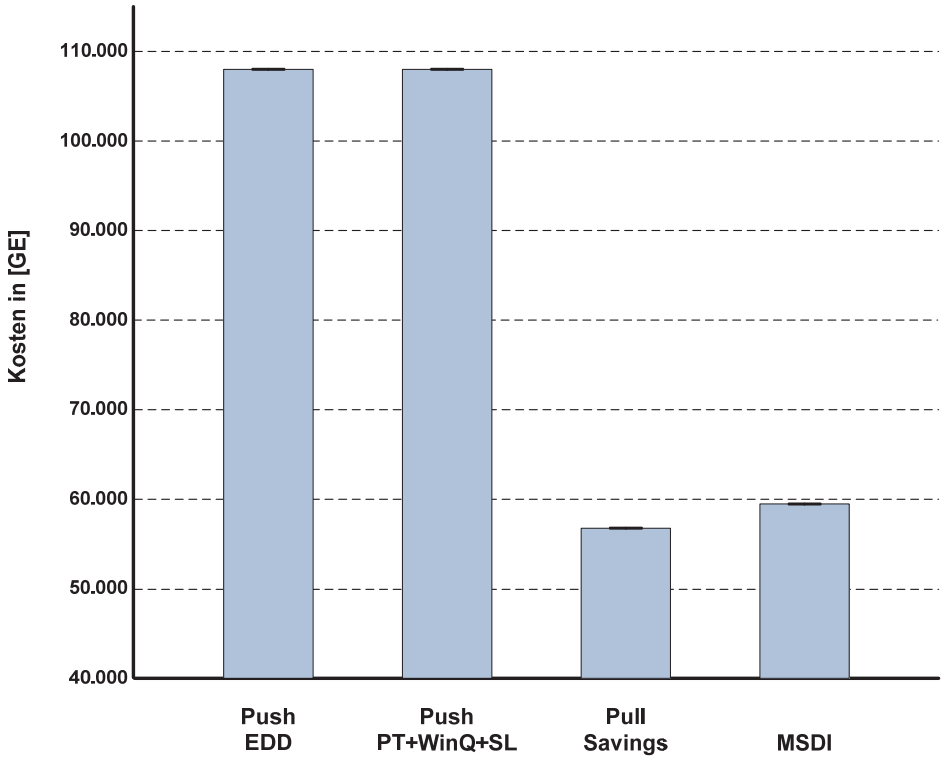


Abbildung 56: Durchschnittliche Gesamtkosten des Transports in Variante 4

Kriterium: Gesamtkosten

Die Ergebnisse für dieses Kriterium in dieser Variante sind in qualitativer Sicht analog zu den vorherigen Varianten und in der Abbildung 57 dargestellt. Mit Hilfe des MSDI-Lösungsverfahren ergeben sich die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten für die ermittelten integrierten Gesamtpläne. Im Gegensatz dazu ergeben sich die höchsten durchschnittlichen Gesamtkosten bei den beiden Push-Verfahren. Im Vergleich zum MSDI-Lösungsverfahren ergeben sich für das Pull-Savings Verfahren Mehrkosten von etwa 8%. Beim Push-EDD Verfahren beläuft sich dieser Mehraufwand im Vergleich zum MSDI-Lösungsverfahren auf 13,8% und beim Push-PT+WinQ+SL Verfahren auf 11,1%.

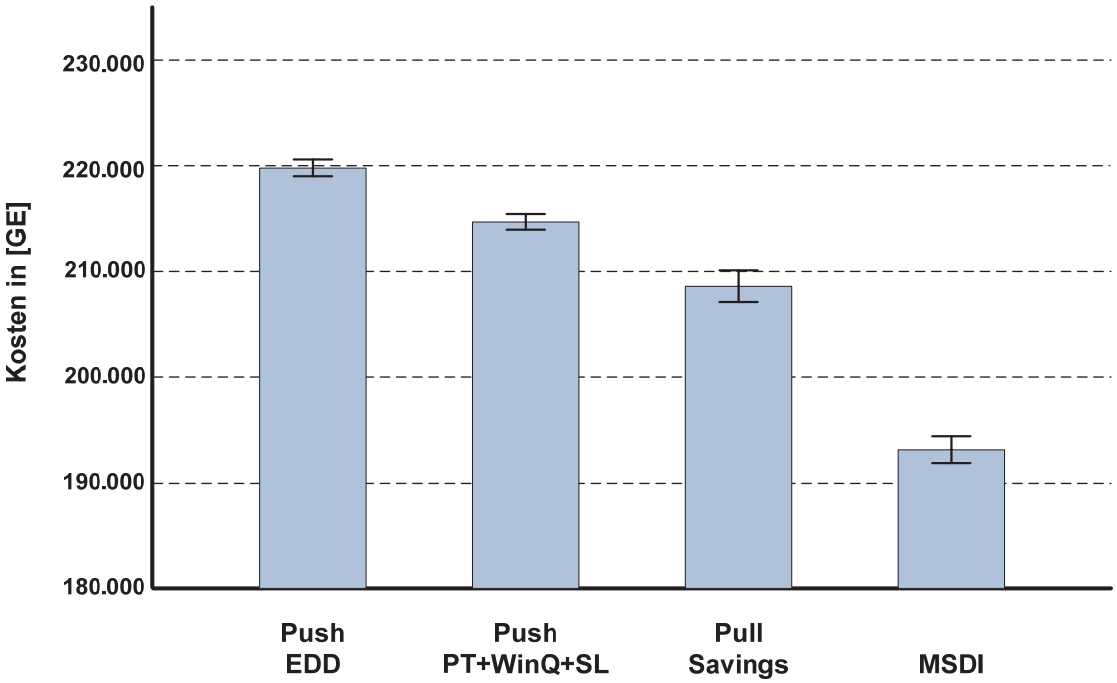


Abbildung 57: Durchschnittliche Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise in Variante 4

Durch die Auswertung der Ergebnisse für die Variante 4 kann festgestellt werden, dass die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten für die einzelnen Teilprobleme erwartungsgemäß nicht durch das MSDI-Lösungsverfahren ermittelt werden. Durch den Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens ergibt sich allerdings bei einer integrierten Betrachtungsweise der geringste Wert für durchschnittlichen Gesamtkosten. Die entsprechende Kostensituation wird in der Abbildung 58 dargestellt.

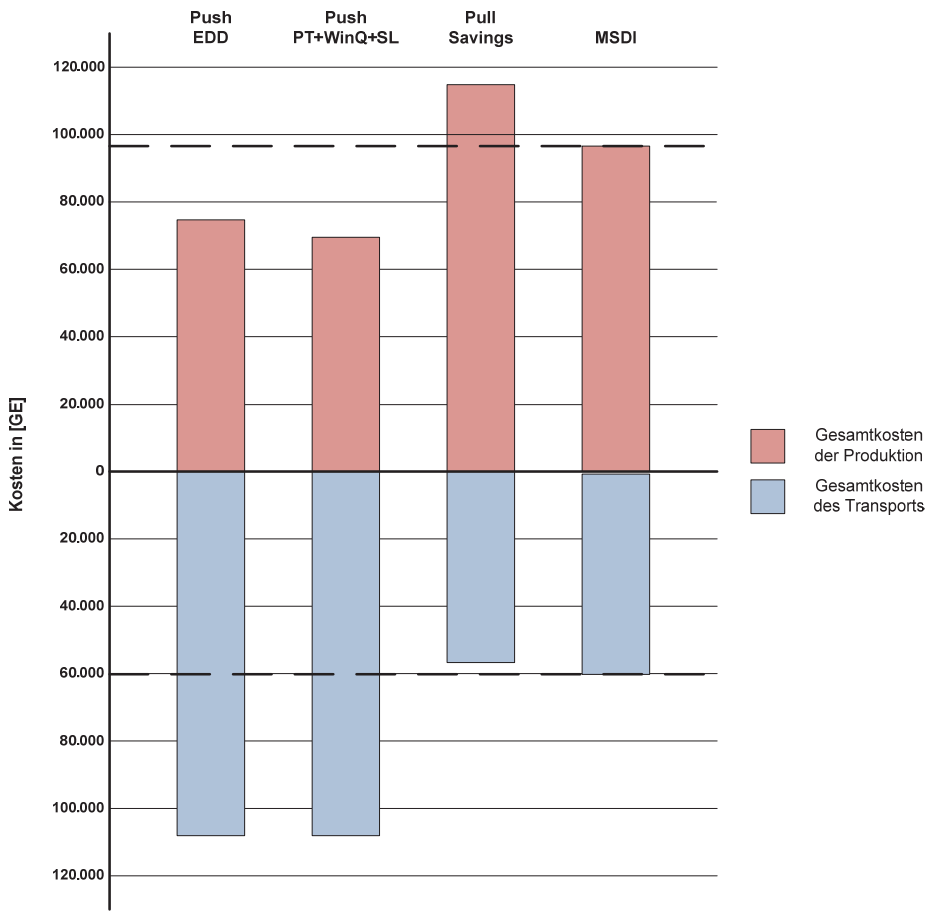


Abbildung 58: Durchschnittliche Gesamtkosten der Teilprobleme in Variante 4

6.6.5 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen für alle untersuchten Varianten, dass die Kosten der durch das MSDI-Lösungsverfahren ermittelten Gesamtplanungsergebnisse unter denen der Vergleichsverfahren liegen. Insbesondere gegenüber den Push-Verfahren bietet sich ein deutliches Verbesserungspotenzial. Durch die integrierte Betrachtung beider Teilprobleme ergibt sich über den gesamten Betrachtungsbereich ein verbessertes Gesamtplanungsergebnis obwohl für die durchschnittlichen Gesamtkosten jedes einzelnen Teilproblems nicht das beste Ergebnis durch das MSDI-Lösungsverfahren erreicht wird. Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der zuvor definierten Kriterien über alle Varianten und Lösungsverfahren vergleichend betrachtet.

Kriterium: Anzahl der besten Gesamtplanungsergebnisse

Wie aus der Abbildung 59 ersichtlich wird, ist das MSDI-Lösungsverfahren gegenüber den Vergleichsverfahren hinsichtlich der Häufigkeit, mit der durch dieses Verfahren das beste integrierte Gesamtplanungsergebnis ermittelt wird, in allen Varianten deutlich überlegen. Mit zunehmender Auslastung sinkt diese Häufigkeit ab, bewegt sich aber in den untersuchten Szenarien dennoch auf einem sehr hohen Niveau von über 77%. Das beste Vergleichsverfahren Push-PT+WinQ+SL kommt nicht über einen Wert von 17,2% für diese Häufigkeit hinaus. Die beiden anderen Vergleichsverfahren liefern bei allen untersuchten Varianten lediglich in 4,7% (bei Anwendung des

Pull-Savings Verfahrens) bzw. in 0,4% (bei Anwendung des Push-EDD Verfahrens) der Fälle die besten Gesamtplanungsergebnisse.

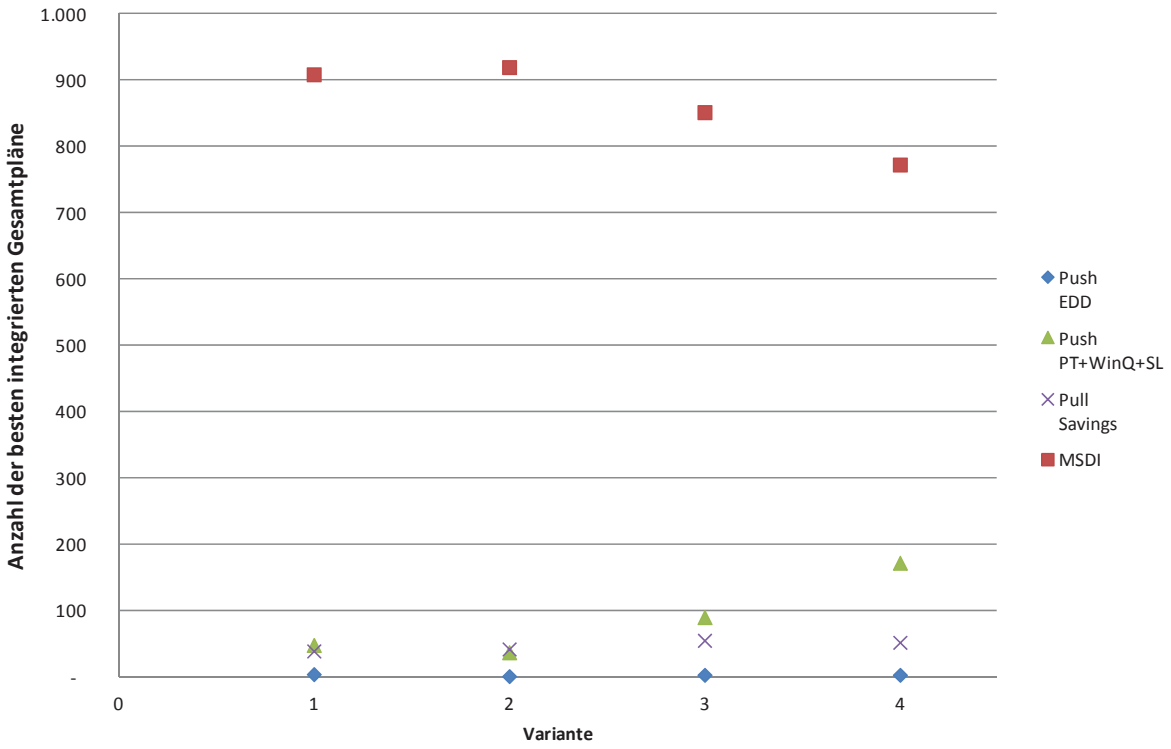


Abbildung 59: Anzahl der besten integrierten Gesamtpläne in den einzelnen Varianten

Kriterium: Gesamtkosten der Warteschlange

Hinsichtlich des Kriteriums der durchschnittlichen Gesamtkosten der Warteschlange wird in allen Varianten durch das MSDI-Lösungsverfahren das beste Gesamtplanungsergebnis erzielt. Auch für dieses Kriterium stellt das Push-PT+WinQ+SL Verfahren das beste Vergleichsverfahren dar, dessen durchschnittliche Gesamtkosten der Warteschlange um etwa 1.000GE über denen des MSDI-Lösungsverfahrens liegen.

Der Kostenverlauf ist sowohl für das MSDI-Lösungsverfahren als auch für die Vergleichsverfahren identisch. Bei den ersten beiden Varianten verharren die durchschnittlichen Gesamtkosten für die Warteschlange auf einem Niveau und steigen ab einer Erhöhung der Auslastung auf 90% deutlich an. Die Abbildung 60 veranschaulicht dieses Verhalten, bei dem ein Verlassen des in den ersten beiden Varianten beobachteten Niveaus ab einer Auslastung von 90% auftritt. Dieses Verhalten konnte bereits beim zuvor betrachteten Kriterium der Anzahl der besten Planungsergebnisse beobachtet werden.

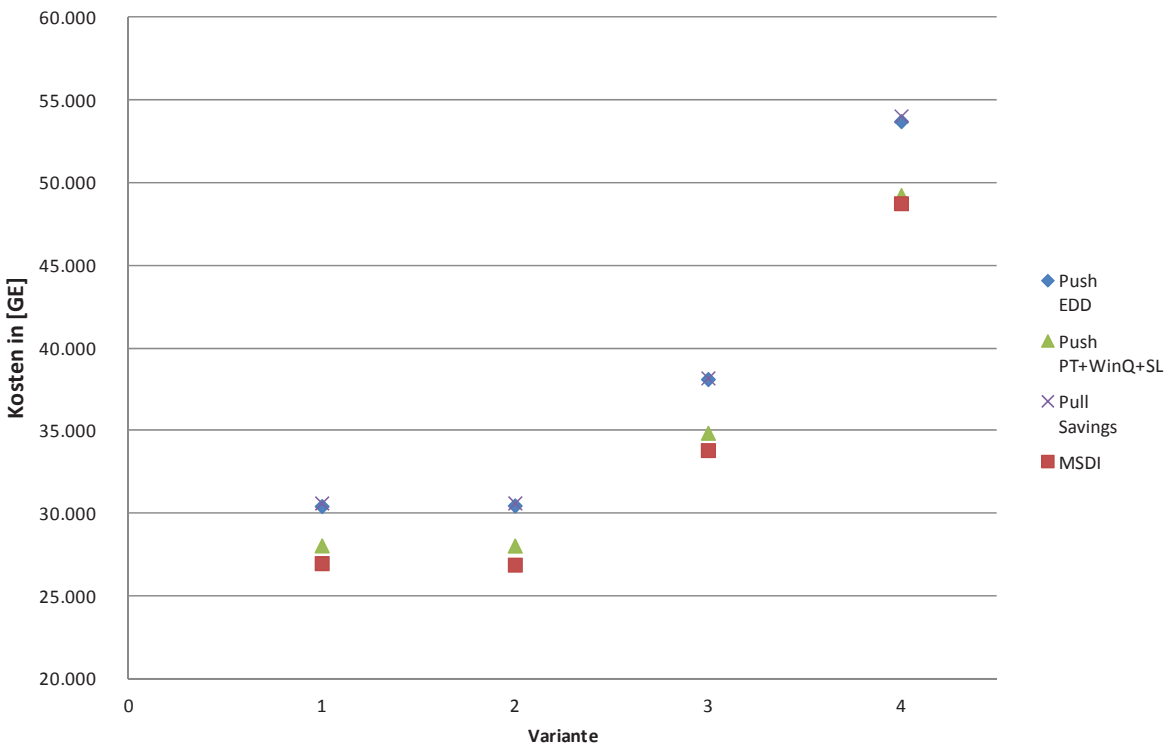


Abbildung 60: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten der Warteschlange

Kriterium: Gesamtkosten des Zwischenspeichers

Für dieses Kriterium ist es nicht möglich, ein in allen Varianten überlegenes Lösungsverfahren zu benennen. Wie in der Abbildung 61 zu erkennen ist, wird mittels des MSDI-Lösungsverfahrens in den ersten beiden Varianten das beste Gesamtplanungsergebnis erzielt. In den Varianten drei und vier steigen die durchschnittlichen Gesamtkosten für die Nutzung des Zwischenspeichers leicht an. Dieses Verhalten ist auch beim Pull-Savings Verfahren allerdings auf einem deutlich höheren Kostenniveau zu beobachten. Im Gegensatz dazu weisen die produktionsorientierten Push-Verfahren in den ersten beiden Varianten die höchsten und in den Varianten drei und vier die geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten auf.

Dieses Verhalten der Push-Verfahren ist damit zu erklären, dass bedingt durch die gesteigerte Auslastung die für die Bildung einer Tour erforderlichen Aufträge in kürzeren Zeitabständen im Zwischenspeicher eintreffen. Dadurch sinken die Verweildauer und folglich auch die dadurch entstehenden Kosten. Beim transportorientierten Pull-Savings Verfahren und beim MSDI-Lösungsverfahren erfolgt zuerst die Tourenbildung. Bei einer Erhöhung der Auslastung treffen eine Vielzahl von Aufträgen in zunehmend kürzeren Zeitabständen im Zwischenspeicher ein. Dadurch steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein eintreffender Auftrag nicht zur Vervollständigung einer bestimmten Tour bestimmt ist, sondern zu einer anderen Tour gehört. Dadurch befinden sich im Zwischenspeicher bei den transportorientierten Verfahren mehr Aufträge mit einer jeweils höheren Verweildauer, die zu unterschiedlichen Touren gehören als bei den produktionsorientierten Verfahren.

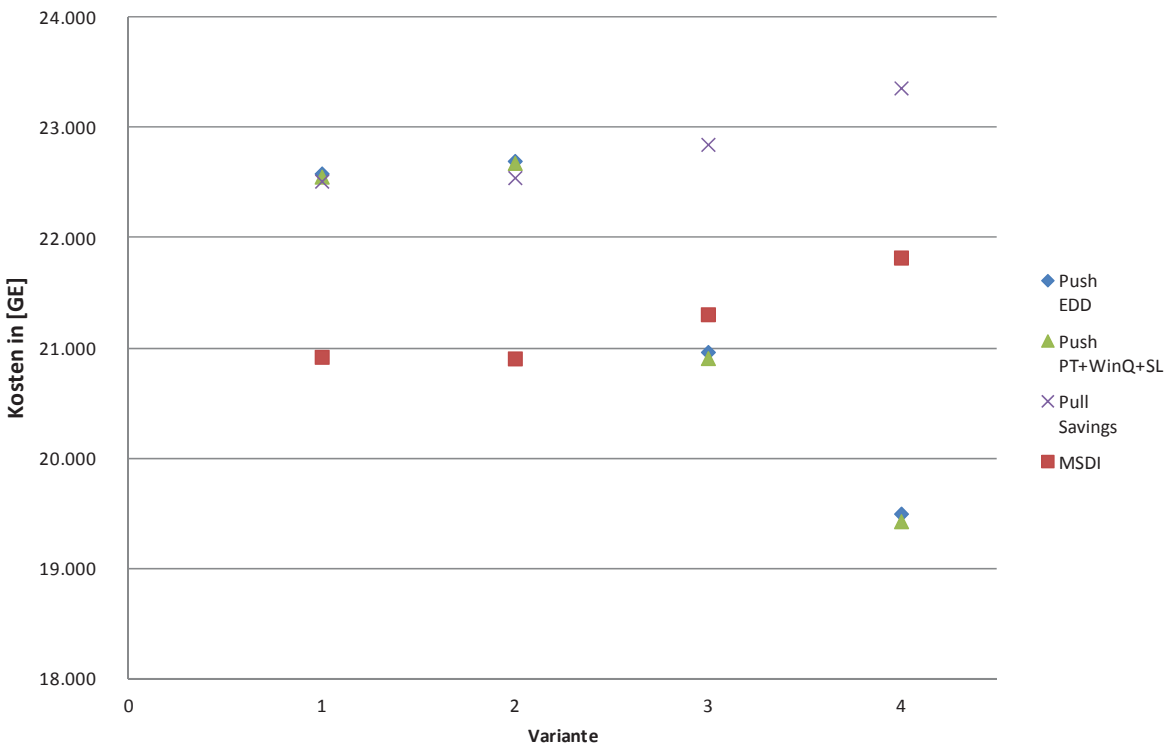


Abbildung 61: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten des Zwischenspeichers

Kriterium: variable Gesamtkosten der Produktion

Erwartungsgemäß weisen die Push-Verfahren die geringsten durchschnittlichen variablen Gesamtkosten für die Produktion auf. Dabei ist festzuhalten, dass die Ergebnisse des Push-PT+WinQ+SL Verfahrens in allen Varianten die geringsten Kosten für dieses Kriterium aufweisen und damit die im Abschnitt 5.1 beschriebene unteren Grenzen darstellen. Durch den Einsatz des transportorientierten Pull-Savings Verfahrens entstehen hingegen die höchsten durchschnittlichen variablen Gesamtkosten für die Produktion, die zwischen 20% und 25% über den Kosten der produktionsorientierten Vergleichsverfahren liegen. Damit können die durch das Pull-Savings Verfahren ermittelten Gesamtplanungsergebnisse als obere Grenzen aufgefasst werden. Die durch das MSDI-Lösungsverfahren ermittelten variablen Gesamtkosten der Produktion liegen in allen Varianten zwischen den Werten der Vergleichsverfahren. In der Abbildung 62 sind diese Ergebnisse dargestellt.

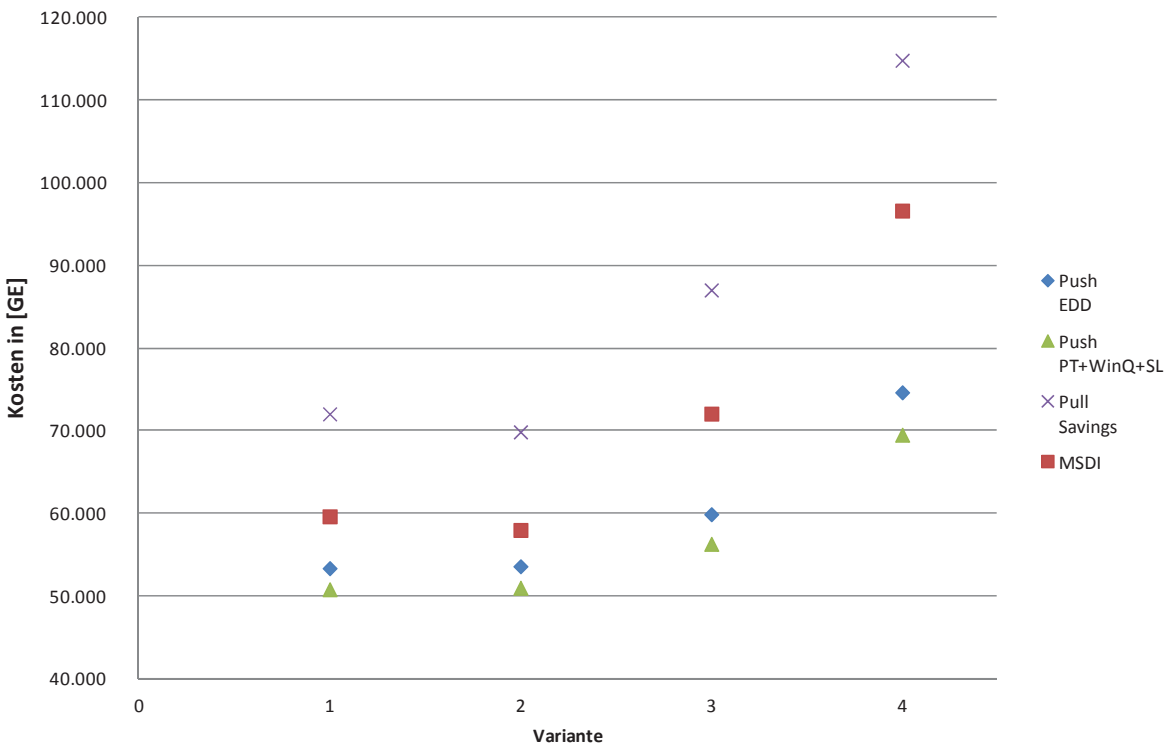


Abbildung 62: Vergleich der durchschnittlichen variablen Gesamtkosten der Produktion

Kriterium: Gesamtkosten der Transporte

In Analogie zum Kriterium der durchschnittlichen Gesamtkosten der Produktion ergeben sich beim transportorientierten Pull-Savings Verfahren erwartungsgemäß die geringsten Kosten für das Kriterium der durchschnittlichen Gesamtkosten der Transporte. Deshalb kann diese auch als untere Grenze für die Transportplanung angesehen werden. Im Gegensatz dazu weisen die produktionsorientierten Push-Verfahren die höchsten Gesamtkosten auf und markieren deshalb die obere Grenze auf Seite der Produktion. Diese bleiben in allen Varianten auf einem hohen Niveau, das entsprechend der Abbildung 63 etwa dem 1,8fachen des besten Vergleichsverfahrens entspricht. Die Durchschnittlichen Gesamtkosten liegen beim MSDI-Lösungsverfahren nur geringfügig über denen des Pull-Savings Verfahren und damit erneut zwischen der oberen und unteren Grenze.

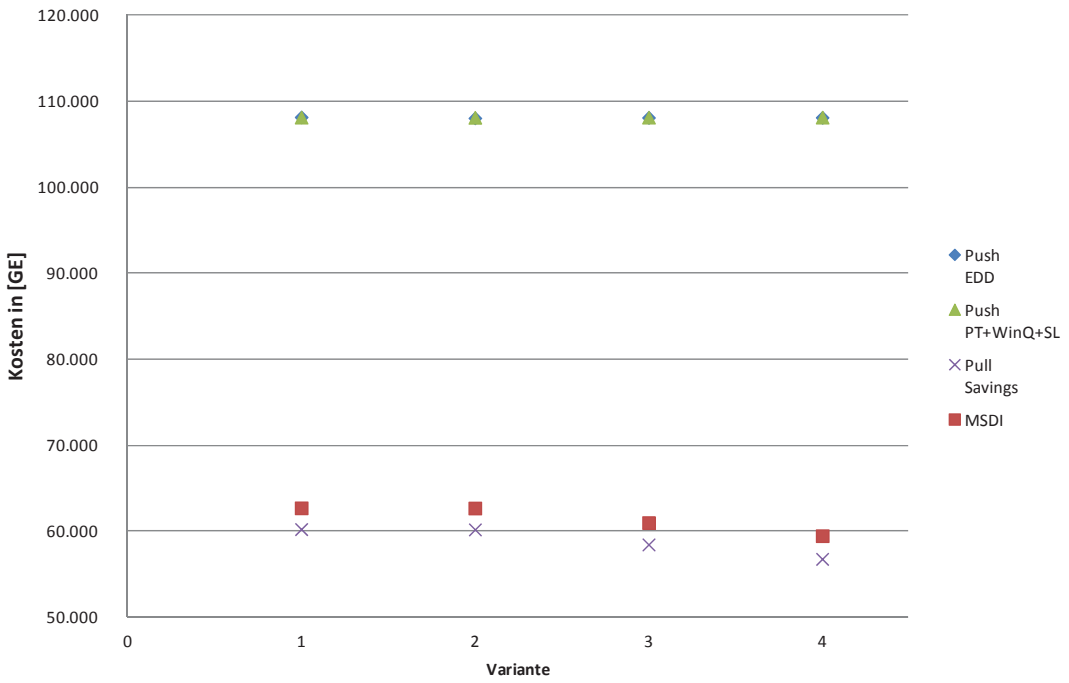


Abbildung 63: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten des Transports

Kriterium: Gesamtkosten

Nach der Betrachtung detaillierten Betrachtung der Kostenbestandteile ergibt sich für den Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten die in der Abbildung 64 dargestellte Situation. Das MSDI-Lösungsverfahren ermittelt in allen untersuchten Varianten die integrierten Gesamtplanungsergebnisse mit den geringsten durchschnittlichen Kosten.

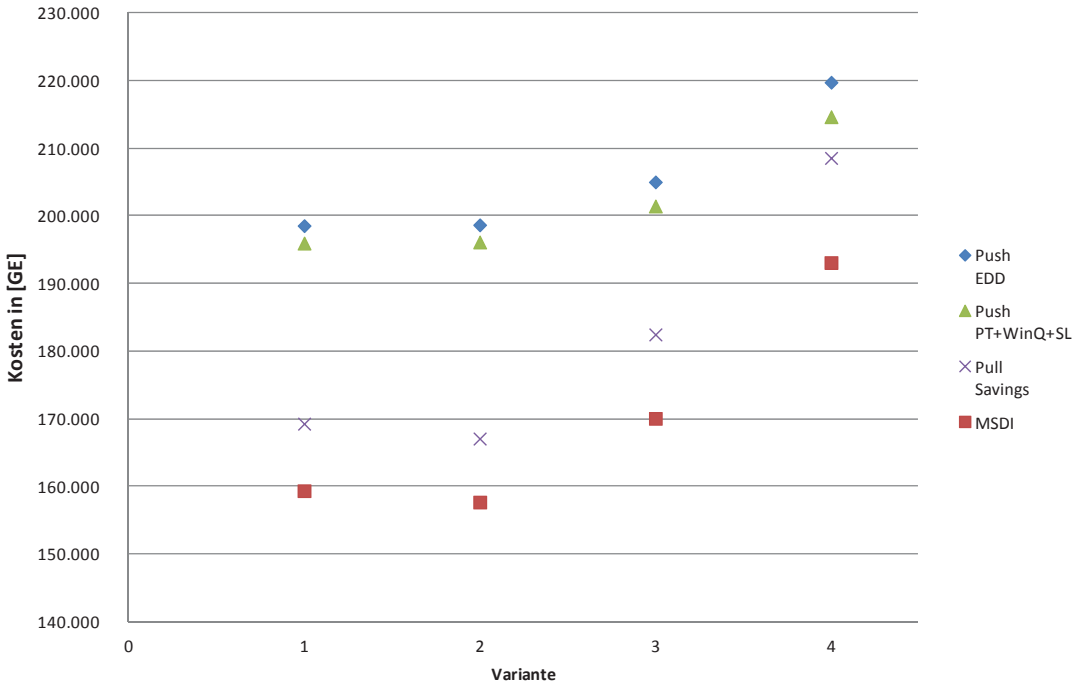


Abbildung 64: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtkosten bei integrierter Betrachtungsweise

6.6.6 Sensitivitätsanalyse

Das Ziel der Sensitivitätsanalyse besteht darin festzustellen, bis zu welchen Verhältnis zwischen Produktions- und Transportkosten das MSDI-Lösungsverfahren den Vergleichsverfahren überlegen ist. Durch die Ergebnisse dieser Untersuchung kann auf Basis der existierenden Kostenverhältnisse bereits im Vorfeld einer Planung festgestellt werden, ob ein Einsatz des MSDI-Lösungsverfahrens Erfolg versprechend erscheint. Dies ist dann der Fall, wenn durch das MSDI-Lösungsverfahren in über 50% der Fälle ein besseres Gesamtplanungsergebnis als durch die Vergleichsverfahren erreicht werden kann. Wenn mindestens eines der Vergleichsverfahren häufiger ein besseres Gesamtplanungsergebnis ermittelt, sollte dieses dem MSDI-Lösungsverfahren vorgezogen werden. Für die Sensitivitätsanalyse wurde exemplarisch die Variante 3 mit einer 90%igen Auslastung ausgewählt und detailliert mit unterschiedlichen Kostenverhältnissen untersucht. Dabei wurden für jedes der untersuchten Kostenverhältnisse erneut 1.000 Replikationen mit jeweils 500 Aufträgen durchgeführt. Das Ergebnis ist in der Abbildung 65 dargestellt.

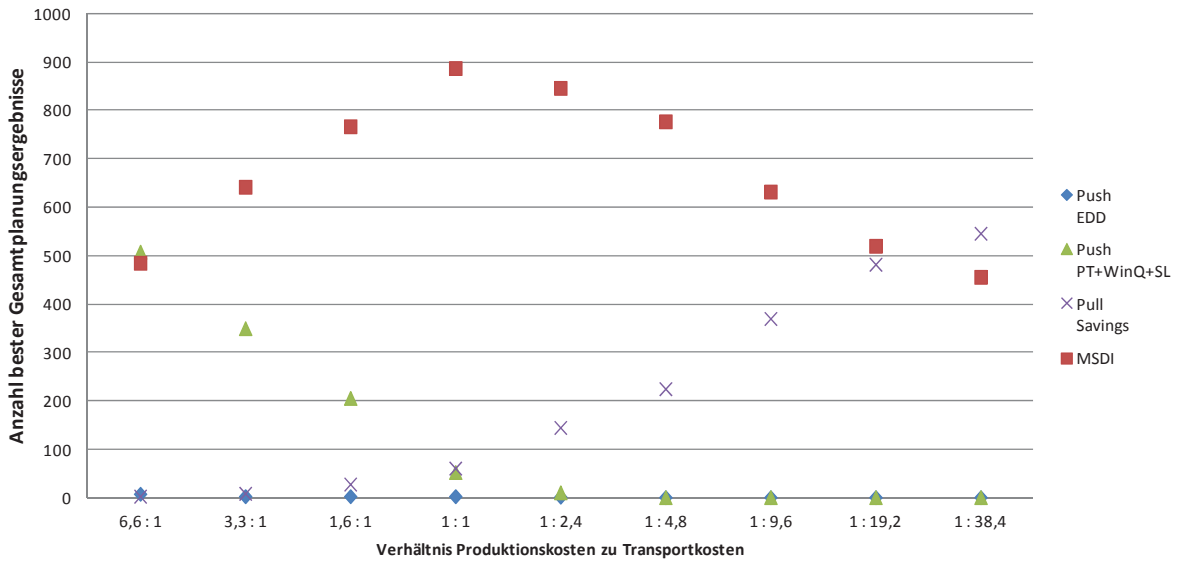


Abbildung 65: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse bei 90%iger Auslastung

Aus der Abbildung 65 ist erkennbar, dass für den Fall, dass die durchschnittlichen variablen Produktionskosten die durchschnittlichen variablen Transportkosten mindestens um den Faktor 6,6 übersteigen, das MSDI-Lösungsverfahrens nicht mehr in der Mehrzahl der Fälle das beste Gesamtplanungsergebnis liefert. Ab diesem Kostenverhältnis kann der Einsatz des gewählten Push-Vergleichsverfahrens empfohlen werden. Auf der anderen Seite müssen die durchschnittlichen variablen Transportkosten die durchschnittlichen variablen Produktionskosten mindestens um den Faktor 20 übersteigen, damit das Pull-Savings Verfahren in der überwiegenden Anzahl der Fälle das beste Gesamtplanungsergebnis liefert.

Durch diese Sensitivitätsanalyse konnte nachgewiesen werden, dass das MSDI-Lösungsverfahren in einem breiten Kostenspektrum einsetzbar ist. Einschränkend muss festgehalten werden, dass diese Ergebnisse zunächst für das hier untersuchte Evaluationsszenario mit dieser Parameterkonstellation gelten. Bei einer Variation der Parameter bzw. bei einem anderen Szenario müssen die entsprechenden Kostenverhältnisse erneut ermittelt werden.

6.6.7 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluation erfolgt hinsichtlich der Abschnitt 6.4 definierten Bewertungskriterien.

Lösungsgüte (Accuracy)

Zur Ermittlung der Lösungsgüte wurden alle prozessrelevanten Indikatoren in monetäre Bewertungen überführt. Zusammen mit den in der Simulationsstudie ermittelten Kosten für die einzelnen Varianten und Vergleichsverfahren ergibt sich das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Bild hinsichtlich der Lösungsgüte:

Für die durch das Pull-Savings Verfahren erzielten Ergebnisse ist im besten Fall ein finanzieller Mehraufwand von etwa 6% (Variante 2) und im schlechtesten Fall in Höhe von etwa 8% (Variante 4) gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren erforderlich. Das Push-PT+WinQ+SL Verfahren ist das beste produktionsorientierte Verfahren, das im besten Fall einen finanziellen Mehraufwand von etwa 11,1% (Variante 4) und im schlechtesten Fall in Höhe von etwa 24,4% (Variante 2) gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren verursacht. Die Tabelle 9 stellt die verursachten Mehrkosten aller Verfahren gegenüber dem in der jeweiligen Variante besten Verfahren gegenüber.

Tabelle 9: Verursachte Mehrkosten gegenüber dem besten Verfahren

Mehrkosten in [%]	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Push-EDD	24,59	26,00	20,56	13,81
Push-PT+WinQ+SL	22,97	24,39	18,46	11,17
Pull-Savings	6,22	5,96	7,31	8,02
MSDI	-	-	-	-

Es hat sich gezeigt, dass für das gewählte Evaluationsszenario das MSDI-Lösungsverfahren allen anderen Verfahren in allen Varianten überlegen ist. Basierend auf diesen Ergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass durch dieses Verfahren im Vergleich zu den Vergleichsverfahren eine sehr hohe Lösungsgüte erreicht wird. Auf Basis dieser Ergebnisse erhält das MSDI-Lösungsverfahren die beste (++) und das Push-EDD Verfahren eine um 3 Stufen schlechtere Bewertung (o). Die beiden anderen Vergleichsverfahren ordnen sich dazwischen ein.

Ausführungsgeschwindigkeit (Speed)

Hinsichtlich der Ausführungsgeschwindigkeit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das Push-EDD Verfahren alle anderen Verfahren in allen Varianten dominiert. Die Ursache dafür liegt in der einfachen Funktionsweise dieses Vergleichsverfahrens. Im Gegensatz dazu weist das MSDI-Lösungsverfahren die höchste zur Lösungsfindung benötigte Zeit auf. Auch dies ist durch die Komplexität des Verfahrens begründet, dass unterschiedliche Verfahren und Methoden im Lösungsablauf erfordert. Auf Grund der technischen Möglichkeiten und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung moderner IT-Systeme ergibt sich allerdings kein praxisrelevanter Unterschied in der Ausführungsgeschwindigkeit. Der Vollständigkeit wegen erhält dennoch das Push-EDD Verfahren die beste (++) und das MSDI-Lösungsverfahren eine um zwei Stufen schlechtere Bewertung (o).

Einfachheit (Simplicity)

Unter dem Aspekt der Einfachheit ist das Push-EDD Verfahren allen anderen Verfahren deutlich überlegen. Die einfache Funktionsweise dieses Verfahrens, dessen Kern eine Sortierung von Aufträgen hinsichtlich des due dates darstellt, wirkt sich sowohl auf das Verständnis durch den Anwender als auch unter dem Blickwinkel der Implementierung positiv aus. Aus diesem Grund erhält dieses Verfahren die beste Bewertung (++). Sowohl das Push-PT+WinQ+SL als auch das Pull-Savings Verfahren erfordern für die Bestimmung der Auftragsreihenfolge mehrere Schritte, was somit auch zu einer gesteigerten Komplexität führt und sich in einer schlechteren Bewertung ausdrückt. Das MSDI-Lösungsverfahren hingegen weist die höchste Komplexität aller betrachteten Verfahren auf und wird folglich auch am schlechtesten bewertet (o).

Flexibilität (Flexibility)

Die Flexibilität aller Vergleichsverfahren kann als gut bewertet werden, da sie auf verschiedene Szenarien mit einer Job Shop bzw. Flow Shop Fertigungsorganisation bzw. bei unterschiedlich gestalteten Distributionsnetzen angewendet werden können. Das MSDI-Lösungsverfahren erhält die höchste Bewertung auf Grund des entwickelten Frameworks für Lösungsverfahren mit mehrstufiger Dekomposition und Integration. Durch dieses Framework ist es möglich, die für die vorhandene Fertigungsorganisation und die Auftrags- und Produktstruktur bzw. die für die Struktur des Distributionsnetzes am besten geeigneten Lösungsverfahren auszuwählen. Diese Flexibilität weisen die gewählten Vergleichsverfahren nicht auf.

Integrationsgrad

Das MSDI-Lösungsverfahren weist von allen betrachteten Verfahren mit großem Abstand den höchsten Integrationsgrad auf, was sich auch in der Bewertung ausdrückt. Durch die Funktionsweise des Verfahrens wurde sichergestellt, dass die Anforderungen und Restriktionen des einen Teilproblems im jeweils anderen Teilproblem bei der Ermittlung einer integrierten Gesamtlösung berücksichtigt werden. Die Vergleichsverfahren hingegen weisen lediglich eine Integration über die Planungsrichtung auf und erhalten aus diesem Grund eine deutlich schlechtere Bewertung (-).

Übersicht über die vergleichende Bewertung

In der Tabelle 10 sind die Ergebnisse der vergleichenden Bewertung in einer Übersicht zusammengefasst. Bei einer gleichgewichteten Betrachtung der Bewertungskriterien lässt sich feststellen, dass durch das MSDI-Lösungsverfahren in drei von insgesamt fünf Bewertungskriterien die besten Ergebnisse erzielt werden konnten.

Tabelle 10: Vergleichende Bewertung der untersuchten Lösungsverfahren

Bewertungskriterium	Push EDD	Push PT+WinQ+SL	Pull Savings	MSDI
Lösungsgüte	-	o	+	++
Ausführungsgeschwindigkeit	++	+	+	o
Einfachheit	++	+	+	o
Flexibilität	+	+	+	++
Integrationsgrad	-	-	-	++

Unter Berücksichtigung der Wichtigkeit der einzelnen Bewertungskriterien kann darüber hinaus konstatiert werden, dass die Bewertungskriterien Lösungsgüte sowie Flexibilität und Integrationsgrad einen höheren Stellenwert einnehmen als die Einfachheit und die Ausführungsgeschwindigkeit. Insbesondere die Lösungsgüte erscheint als das relevante Kriterium für einen Einsatz in der praktischen Anwendung. Aber auch die Flexibilität darf bei einem praktischen Einsatz in den eingangs beschriebenen volatilen und dynamischen Märkten nicht vernachlässigt werden. Durch die Ergebnisse der Evaluation konnte erneut nachgewiesen werden, dass ein Lösungsverfahren mit einem hohen Integrationsgrad zu einem deutlich verbesserten Gesamtplanungsergebnis führt. Aus diesem Grund kommt diesem Bewertungskriterium ebenfalls eine hohe Bedeutung zu, das folglich auch einen hohen Einfluss auf das Kriterium der Lösungsgüte hat. In diesen drei Bewertungskriterien mit dem höchsten Stellenwert, dominiert das MSDI-Lösungsverfahren die betrachteten Vergleichsverfahren.

7 Zusammenfassung, kritische Betrachtung und Ausblick

Die Konzentration auf die eigenen Kernkompetenzen ist eine Reaktion der Unternehmen auf die steigenden Anforderungen weltweit vernetzter Märkte. Vor diesem Hintergrund entstehen Prozessketten, denen eine Vielzahl von Unternehmen angehören, die von den Kunden allerdings als eine Organisationseinheit wahrgenommen werden. Dies führt zu einem Wettbewerb zwischen ganzen Lieferketten, weshalb die Fähigkeit einer unternehmensübergreifenden Betrachtung, Koordinierung und Steuerung zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden ist. Folglich ist es notwendig, die in einer Lieferkette stattfindenden Produktions- und die sich daran anschließenden Distributionsprozesse in integrierter Weise zu betrachten und dadurch die Leistungsfähigkeit der gesamten Lieferkette zu steigern. Im Zuge einer integrierten Betrachtungsweise wurden die beiden in dieser Arbeit relevanten Teilprobleme Produktions- und Transportplanung auf operativer Ebene zu einem simultan betrachteten Optimierungsproblem zusammengeführt. Dadurch konnte der Betrachtungsbereich dieser Arbeit auf das in der Literatur bekannte IPODS Problem eingegrenzt werden.

Zur Lösung dieses Problems wurden bisher Lösungsverfahren entwickelt, die in der Mehrzahl eine sequenzielle Vorgehensweise verfolgen, indem zunächst das eine Teilproblem gelöst und darauf aufbauend das nachfolgende Teilproblem betrachtet wird. Diese Vorgehensweise weist nur einen begrenzten Integrationsgrad auf, da eine Integration ausschließlich über die Planungsrichtung (push oder pull) stattfindet. Nur sehr wenige Lösungsverfahren arbeiten nach der gekoppelten Vorgehensweise und betrachten beide Probleme simultan. Allerdings arbeiten diese existierenden Lösungsverfahren auf der gesamten Lösungsmenge und sind auf Grund der Problemgröße und der Funktionsweise folglich nur auf sehr kleine Probleminstanzen anwendbar. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war es, ein integriertes Lösungsverfahren zu entwickeln, dass auf einer simultanen Betrachtungsweise basiert sowie eine hohe Verzahnung der Teilprobleme ermöglicht und auf große Probleminstanzen anwendbar ist. Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels wurde in dieser Arbeit eine mehrstufige Dekomposition und Integration des Planungsproblems als Erfolg versprechender Ansatz gewählt.

Aufbauend auf der Betrachtung der Grundlagen der beiden Teilprobleme Produktions- und Transportplanung wurden die für diese Arbeit relevanten Aspekte und Lösungsverfahren detailliert beschrieben. Anschließend wurden die Grundlagen und der aktuelle Stand für das IPODS Problem dargestellt. Dabei wurden die wesentlichen Punkte und die Struktur übernommen, die bei der Betrachtung der Grundlagen der beiden Teilprobleme angewendet wurde. Darüber hinaus wurde der aktuelle Stand der Forschung im Zuge dieser Arbeit erweitert. Die identifizierten Lücken im Stand der Forschung konnten durch die Erreichung der Nebenziele geschlossen werden. Damit liefern die im Zuge der Arbeit entstandenen Ergebnisse einen ergänzenden Beitrag zur umfassenden Betrachtung dieser Thematik, der über die eigentliche Entwicklung eines Lösungsverfahrens hinausgeht.

So wurde aus den beiden Zielsystemen der Teilprobleme ein Zielsystem für das IPODS Problem abgeleitet. Darüber hinaus konnte im Zuge der Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung festgestellt werden, dass eine Klassifizierung durch ein Repräsentationsschema auf Grund der hohen Anzahl an Parametern in einem Planungsmodell sinnvoll ist. Ein solches Repräsentationsschema erlaubt eine überblicksartige Charakterisierung des vorliegenden Modells ohne eine detaillierte Betrachtung. Im Rahmen der Literaturrecherche hat sich herausgestellt, dass die vorhandenen Klassifizierungsansätze nicht ausreichen, um ein Planungsmodell hinreichend zu

charakterisieren. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung eines geeigneten Repräsentationsschemas als ein Teilziel definiert, das in dieser Arbeit auch erreicht werden konnte.

Bei der detaillierten Auseinandersetzung mit den in der Literatur vorhandenen Planungsmodellen hat sich weiterhin gezeigt, dass bisherige Lösungsverfahren in der Regel ein eigens entwickeltes Planungsmodell verwenden. Ein Standardmodell, wie es in den einzelnen Teilproblemen seit Jahrzehnten verwendet wird, existierte bisher nicht. Durch die detaillierte Betrachtung und Zusammenführung der in der Literatur verwendeten Planungsmodelle konnte in dieser Arbeit ein Standardmodell für das IPODS Problem entwickelt werden, das als Grundlage für die weiteren Betrachtungen dient. In diesem Zusammenhang ist auch deutlich geworden, dass es bisher keinen umfassenden Überblick über die vorhandenen Lösungsverfahren und deren Strukturierung gibt. Ein solcher konnte im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden, sodass diese Lücke ebenfalls geschlossen werden konnte.

Die bis dahin erreichten Ergebnisse dienten als Grundlage für die Entwicklung eines Lösungsverfahrens für das IPODS Problem, das eigentliche Hauptziel der Arbeit. Aufbauend auf einer Analyse der existierenden Lösungsverfahren konnten Anforderungen definiert werden. So sollte das Lösungsverfahren entsprechend der gekoppelten Vorgehensweise arbeiten und dabei eine hohe Integration der Teilprobleme sicherstellen. Darüber hinaus bestanden die Anforderungen an eine hohe Lösungsqualität sowie an eine einfache Übertragbarkeit auf andere Modelle des hier betrachteten integrierten Planungsproblems. Durch die Entwicklung eines Framework und des MSDI-Lösungsverfahrens konnten alle gestellten Anforderungen erfüllt werden. Durch das entwickelte Framework ist eine generelle Vorgehensweise mit mehrstufiger Dekomposition und Integration festgelegt, wobei die Ermittlung eines integrierten Gesamtplanungsergebnisses aus bereits integrierten Teilergebnissen erfolgt. Bei der konkreten Ausgestaltung des MSDI-Lösungsverfahrens kommen bereits existierende Verfahren zur Lösung der einzelnen Teilprobleme zum Einsatz, die für das jeweilige Teilproblem sehr gute Ergebnisse erzielen. Durch die Möglichkeit, die verwendeten Methoden und Verfahren auf die jeweilige Problemstellung anzupassen, wird eine einfache Übertragbarkeit sichergestellt.

Für die Evaluation des entwickelten Frameworks und des MSDI-Lösungsverfahrens wurde ein Szenario definiert, anhand dessen die Funktionsfähigkeit nachgewiesen und die Leistungsfähigkeit mittels zuvor definierter Bewertungskriterien in Relation zu den Vergleichsverfahren überprüft werden konnte. Das verwendete Teilszenario Produktion weist dabei einen starken Praxisbezug auf, wohingegen das Teilszenario Transport aus der Literatur übernommen wurde. Eine umfangreiche Simulationsstudie mit verschiedenen Varianten, die durch unterschiedliche Parameterwerte gekennzeichnet sind, bildete den Kern der Evaluation. Als Ergebnis der Evaluation kann festgehalten werden, dass sowohl das Framework als auch das MSDI-Lösungsverfahren die gestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllen. Der Leistungsvergleich hat ergeben, dass das MSDI-Lösungsverfahren den Vergleichsverfahren hinsichtlich des Kriteriums der Gesamtkosten in allen untersuchten Varianten überlegen ist. Bei der Anwendung der Vergleichsverfahren ergeben sich je nach Variante und dem jeweiligen Vergleichsverfahren Mehrkosten gegenüber dem MSDI-Lösungsverfahren zwischen 6% und 26%. Dabei ist festzuhalten, dass die durch das MSDI-Lösungsverfahren ermittelten Lösungen für die jeweiligen Teilprobleme von den jeweils besten bekannten Lösungen abweichen. Folglich kann durch ein Abrücken von den für das jeweilige Teilproblem besten Lösungen ein insgesamt verbessertes Gesamtplanungsergebnis erreicht werden. Dadurch konnte der integrative Charakter des MSDI-Lösungsverfahrens nachgewiesen werden.

Bei einer Anwendung der integrierten Planung im Allgemeinen und des MSDI-Lösungsverfahrens im Besonderen im praktischen Umfeld werden die Grenzen des Verfahrens deutlich. Diese liegen weniger in dem Lösungsverfahren selbst begründet sondern vielmehr in den allgemeinen Erfordernissen einer integrierten Planung. Für die Durchführung einer integrierten Planung ist ein hohes Maß an Vertrauen zwischen den beteiligten Partnern erforderlich, das im Wesentlichen durch einen intensiven Informationsaustausch gekennzeichnet ist. Dazu zählt auch die Transparenz hinsichtlich der Kosten der jeweiligen Partner. Erst wenn diese Kostentransparenz gegeben ist, können die durch das MSDI-Lösungsverfahren ermittelten Gesamtplanungsergebnisse monetär bewertet und mit der bisherigen Kostensituation verglichen werden. Auf der anderen Seite ist es den beteiligten Partnern bei unterstellter Kostentransparenz nicht mehr möglich, in herkömmliche Preisverhandlungen zu treten, da bei bekannter Kostensituation keiner der Partner mehr in eine diesbezügliche Verhandlungsposition treten kann. Dieses Dilemma begrenzt die Anwendung der integrierten Planung in der Praxis auf Partner mit einem ausgeprägten Vertrauensverhältnis.

Basierend auf den in dieser Arbeit erreichten Resultaten ergeben sich Fragen für zukünftige Untersuchungen, die sich in drei Bereiche gliedern lassen. Zum einen sollten weitere Untersuchungen zum MSDI-Lösungsverfahren durchgeführt werden. So sollten weitere Parameterkonstellationen untersucht und auf das verwendete sowie auf weitere Evaluationsszenarien angewendet werden. Dies sollte dazu dienen, die Aussagen zur Flexibilität des MSDI-Lösungsverfahrens weiter zu verdichten. Weiterhin sollten zusätzliche Vergleichsverfahren definiert und deren Leistungsfähigkeit in ein Verhältnis zum MSDI-Lösungsverfahren gebracht werden, um die Ergebnisse zur Lösungsqualität zu untermauern.

Der zweite Bereich betrifft weitere Fragestellungen im Rahmen des entwickelten Frameworks. In diesem Zusammenhang sollten weitere auf dem Framework basierende Lösungsverfahren entwickelt werden, die andere Methoden als die bisher verwendeten, einsetzen. Diese sollten dann in analoger Weise hinsichtlich der definierten Bewertungskriterien untersucht werden. Darüber hinaus ist ebenfalls die Entwicklung anderer allgemeiner Vorgehensweisen erstrebenswert, die ebenfalls auf einer mehrstufigen Dekomposition und Integration beruhen. Dadurch könnten auch durch andere Lösungsverfahren die Nachteile der sequenziellen Lösungsverfahren bzw. der Lösungssuche in der gesamten Lösungsmenge vermieden werden.

Der dritte Bereich ist gekennzeichnet durch allgemeine Fragestellungen zur integrierten Planung. So sollte eine Möglichkeit zur objektiven Bewertung des Integrationsgrads gefunden werden. Durch diesbezügliche Aussagen über die Intensität der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen ist eine schnelle und gezielte Auswahl von geeigneten Planungs- und Steuerungsmethoden möglich. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob Gesetzmäßigkeiten in der Lösungsstruktur oder bei der Lösungsfindung identifiziert werden können, die zur Entwicklung neuer Lösungsverfahren mit verkürzter Rechenzeit genutzt werden können.

Literaturverzeichnis

[Acker, 2011] Acker, I. J.: Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.

[Adams et al., 1988] Adams, J.; Balas, E. und Zawack, D.: The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. *Management Science*, 34 (1988) 3, S.391-401.

[Aggarwal et al., 1973] Aggarwal, S. C.; Paul Wyman, F. und McCarl, B. A.: An investigation of a cost-based rule for job-shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 11 (1973) 3, S.247-261.

[Agnetis et al., 2006] Agnetis, A.; Hall, N. G. und Pacciarelli, D.: Supply chain scheduling: Sequence coordination. *Discrete Applied Mathematics*, 154 (2006) 15, S.2044-2063.

[Akyol und Bayhan, 2007] Akyol, D. E. und Bayhan, G. M.: A review on evolution of production scheduling with neural networks. *Computers & Industrial Engineering*, 53 (2007) 1, S.95-122.

[Albrecht, 2010] Albrecht, M.: Supply Chain Coordination Mechanisms: New approaches for collaborative planning. Springer, Berlin u. a., 2010.

[Allahverdi et al., 2008] Allahverdi, A.; Ng, C. T.; Cheng, T. C. E. und Kovalyov, M. Y.: A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Researc*h, 187 (2008) 3, S.985-1032.

[Anthony, 2000] Anthony, T.: Supply chain collaboration: Success in the new internet economy. Whitepaper, Montgomery Research Inc., San Francisco (USA), 2000, S.41-44.

[Applegate et al., 2006] Applegate, D. L.; Bixby, R. E.; Chvátal, V. und Cook, W. J.: The traveling salesman problem - A computational study. Princeton University Press, New Jersey (USA), 2006.

[Archetti et al., 2011] Archetti, C.; Bertazzi, L.; Paletta, G. und Speranza, M. G.: Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system. *Computers & Operations Research*, 38 (2011) 12, S.1731-1746.

[Arisha et al., 2001] Arisha, A.; Young, P. und El Baradie, M.: Job shop scheduling problem: An overview. Proceedings of the International Conference for Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 01), Dublin (Irland), 2001. S.682 - 693.

[Arndt, 2013] Arndt, H.: Supply-Chain-Management: Optimierung logistischer Prozesse. 6. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2013.

[Arnold und Furmanns, 2010] Arnold, D. und Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6. erw. Auflage, Springer, Heidelberg u. a., 2010.

[Arnold et al., 2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl., Springer, Berlin u. a., 2008.

[Aryee et al., 2008] Aryee, G.; Naim, M. M. und Lalwani, C.: Supply chain integration using a maturity scale. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 19 (2008) 5, S.559-575.

[Averbakh, 2010] Averbakh, I.: On-line integrated production–distribution scheduling problems with capacitated deliveries. *European Journal of Operational Research*, 200 (2010) 2, S.377-384.

[Averbakh und Xue, 2007] Averbakh, I. und Xue, Z.: On-line supply chain scheduling problems with preemption. *European Journal of Operational Research*, 181 (2007) 1, S.500-504.

[Bacher et al., 2010] Bacher, J.; Pöge, A. und Wenzig, K.: Clusteranalyse - Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. Oldenbourg Verlag, München, 2010.

[Baita und Ukovich, 1998] Baita, F.; Ukovich, W.; Pesenti, R. und Favaretto, D.: Dynamic routing-and-inventory problems: a review. *Transportation Research - Part A: Policy and Practice*, 32 (1998) 8, S.585-598.

[Baker und Trietsch, 2009] Baker, K. R. und Trietsch, D.: Principles of sequencing and scheduling. John Wiley & Sons, New Jersey (USA), 2009.

[Balci, 1998] Balci, O.: Verification, validation and accreditation. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference (WSC'98), Washington D.C. (USA), 1998, S.41-48.

[Balci, 2003] Balci, O.: Validation, verification, and certification of modelling and simulation applications. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (WSC'03), New Orleans (USA), 2003. S.150-158.

[Baldacci et al., 2008] Baldacci, R.; Battarra, M. und Vigo, D.: Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In: Golden, B. L.; Raghavan, S. und Wasil, E. A. (Hrsg.): The Vehicle Routing Problem - Latest advances and new challenges. Springer, New York (USA), 2008.

[Bankhofer et al., 2006] Bankhofer, U.; Wilhelm, M. und Williner, G.: Modelle und Methoden der Tourenplanung. Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik, Technische Universität Illmenau, Ilmenau, 2006.

[Bard und Nananukul, 2009] Bard, J. F. und Nananukul, N.: The integrated production–inventory–distribution–routing problem. *Journal of Scheduling*, 12 (2009) 3, S.257-280.

[Barman und Lisboa, 2010] Barman, S. und Lisboa, J. V.: Cost performance of simple priority rule combinations. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21 (2010) 5, S.567-584.

[Barratt, 2004] Barratt, M.: Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9 (2004) 1, S.30-42.

[Bauer, 2003] Bauer, S.: Perspektiven der Organisationsgestaltung. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Baumgarten, 2004] Baumgarten, H.: Entwicklungsphasen des Supply Chain Managements. In: Baumgarten, H.; Darkow, I.-L. und Zadek, H. (Hrsg.): Supply Chain Steuerung und Services -

Logistik-Dienstleister managen globale Netzwerke - Best Practices. Springer, Berlin u. a., 2004.

[Baumgarten und Darkow, 2004] Baumgarten, H. und Darkow, I.-L.: Konzepte im Supply Chain Management. In: Busch, A. und Dangelmaier, W. (Hrsg.): Integriertes Supply Chain Management – Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 2. Auflage, Gabler, Wiesbaden, 2004.

[Becker und Schütte, 2004] Becker, J. und Schütte, R.: Handelsinformationssysteme. 2. Auflage, Redline Wirtschaft, Frankfurt am Main, 2004.

[Bensel et al., 2008] Bensel, P.; Gunther, O.; Tribowski, C. und Vogeler, S.: Cost-benefit sharing in cross-company RFID applications: A case study approach. Proceedings of the International Conference on Information Systems (ICIS) Paris (Frankreich), 2008.

[Berchtold et al., 2002] Berchtold, C.; Brade, D.; Hofmann, M.; Köster, A.; Krieger, T. und Lehmann, A.: Verifikation, Validierung und Akkreditierung von Modellen und Simulationen. Abschlussbericht, Universität der Bundeswehr München, München, 2002.

[Bhatnangar et al., 1993] Bhatnangar, R.; Chandra, P. und Goyal, S. K.: Models for multi-plant coordination. *European Journal of Operational Research*, 67 (1993) 2, S.141-160.

[Blackstone et al., 1982] Blackstone, J. H.; Phillips, D. T. und Hogg, G. L.: A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20 (1982) 1, S.27-45.

[Blazewicz et al., 1996] Blazewicz, J.; Domschke, W. und Pesch, E.: The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research*, 93 (1996) 1, S.1-33.

[Bleicher, 2003] Bleicher, K.: Integrationsmanagement. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Blum, 2005] Blum, C.: Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews*, 2 (2005), S.353-373.

[Blumenfeld et al., 1991] Blumenfeld, D. E.; Burns, L. D. und Daganzo, C. F.: Synchronizing production and transportation schedules. *Transportation Research - Part B: Methodological*, 25 (1991) 1, S.23-27.

[Bodin und Golden, 1981] Bodin, L. und Golden, B.: Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11 (1981) 2, S.97-108.

[Bogaschewski, 2002] Bogaschewski, R.: Kollaborative Abstimmung in Supply Networks über virtuelle Plattformen. *Industrie Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse*, 18 (2002) 5, S.35-38.

[Bott und Ballou, 1986] Bott, K. und Ballou, R. H.: Research perspectives in vehicle routing and scheduling. *Transportation Research - Part A: General*, 20 (1986) 3, S.239-243.

[Boudia und Prins, 2009] Boudia, M. und Prins, C.: A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 195 (2009) 3, S.703-715.

[Braun, 2003] Braun, J.: Grundlagen der Organisationsgestaltung. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Bräysy und Gendreau, 2005] Bräysy, O. und Gendreau, M.: Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, 39 (2005) 1, S.104–118.

[Breiter et al., 2009] Breiter, A.; Hegmanns, T.; Hellingrath, B. und Spinler, S.: Coordination in supply chain management - Review and identification of directions for future research. In: Voß, S.; Pahl, J. und Schwarze, S. (Hrsg.): Logistik Management - Systeme, Methoden, Integration. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Brucker, 2007] Brucker, P.: Scheduling algorithms. 5. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2007.

[Brucker, 2007a] Brucker, P.: The job-shop problem: Old and new challenges. Proceedings of the 3rd Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications (MISTA), Paris (Frankreich), 2007. S.15-22.

[Burgess et al., 2006] Burgess, K.; Singh, P. J. und Koroglu, R.: Supply chain management: a structured literature review and implications for future research. *International Journal of Operations & Production Management*, 26 (2006) 7, S.703-729.

[Cachon, 2003] Cachon, G. P.: Supply chain coordination with contracts. In: Graves, S. C. und de Kok, A. G. (Hrsg.): Handbooks in operations research and management science - Volume 11 - Supply chain management - Design, coordination and operation. Elsevier, Amsterdam (Niederlande) u. a., 2003.

[Camarinha-Matos und Afsarmanesh, 2008] Camarinha-Matos, L. M. und Afsarmanesh, H. (Hrsg.): Collaborative networks: Reference modelling. Springer, New York (USA), 2008.

[Chandra und Fisher, 1994] Chandra, P. und Fisher, M. L.: Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, 72 (1994) 3, S.503-517.

[Chang und Lee, 2003] Chang, Y.-C. und Lee, C.-Y.: Logistics scheduling: analysis of two-stage problems. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 12 (2003) 4, S.385-407.

[Chang und Lee, 2004] Chang, Y.-C. und Lee, C.-Y.: Machine scheduling with job delivery coordination. *European Journal of Operational Research*, 158 (2004) 1, S.470-487.

[Chauhan et al., 2012] Chauhan, C.; Gupta, R. und Pathak, K.: Survey of methods of solving TSP along with its implementation using dynamic programming approach. *International Journal of Computer Applications*, 52 (2012) 4, S.12-19.

[Chen, 2003] Chen, F.: Information sharing and supply chain coordination. In: de Kok, A. G. und Graves, S. C. (Hrsg.): Handbooks in operations research and management science - Volume 11 - Supply chain management - Design, coordination and operation. Volume 11, Elsevier, Amsterdam (Niederlande) u. a., 2003.

[Chen, 2004] Chen, Z.-L.: Integrated production and outbound distribution operations: Taxonomy, models and review. In: Simchi-Levi, D. W., S.D.; Shen, Z.-J. (Hrsg.): Handbook of qualitative supply chain analysis: Modelling in the e-business era. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Niederlande), 2004.

[Chen, 2010] Chen, Z.-L.: Integrated production and outbound distribution scheduling: Review and extensions. *Operations Research*, 58 (2010) 1, S.130-148.

[Chen und Hall, 2007] Chen, Z.-L. und Hall, N. G.: Supply chain scheduling: conflict and cooperation in assembly systems. *Operations Research*, 55 (2007) 6, S.1072-1089.

[Chen und Lee, 2008] Chen, B. und Lee, C.-Y.: Logistics scheduling with batching and transportation. *European Journal of Operational Research*, 189 (2008) 3, S.871-876.

[Chen und Vairaktarakis, 2005] Chen, Z.-L. und Vairaktarakis, G. L.: Integrated scheduling of production and distribution operations. *Management Science*, 51 (2005) 4, S.614-628.

[Cheng, 2011] Cheng, J.-H.: Inter-organizational relationships and information sharing in supply chains. *International Journal of Information Management*, 31 (2011) 4, S.374-384.

[Childe, 1998] Childe, S. J.: The extended enterprise - a concept of co-operation. *Production Planning & Control*, 9 (1998) 4, S.320-327.

[Choi, 2000] Choi, C. W.: An overview of job shop scheduling problem by local search techniques. Report an der National University of Singapore, Singapur (Singapur), 2000.

[Clark et al., 2001] Clark, T. H.; Croson, D. C. und Schiano, W. T.: A hierarchical model of supply-chain integration: Information sharing and operational interdependence in the US grocery channel. *Information Technology and Management*, 2 (2001) 3, S.261-288.

[Clarke und Wright, 1964] Clarke, G. und Wright, J. W.: Scheduling vehicles from a central delivery depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12 (1964) 4, S.568-581.

[Cohen und Lee, 1988] Cohen, M. A. und Lee, H. L.: Strategic analysis of integrated production-distribution systems: Models and methods. *Operations Research*, 36 (1988) 2, S.216-228.

[Conway et al., 2003] Conway, R. W.; Maxwell, W. L. und Miller, L. W.: Theory of scheduling. Courier Dover Publications, Mineola (USA), 2003.

[Cordeau et al., 2004] Cordeau, J.-F.; Gendreau, M.; Hertz, A.; Laporte, G. und Sormany, J.-S.: New heuristics for the vehicle routing problem. Technical Report G-2004-33, University of Montreal, Montreal (Kanada), 2004.

[Cordeau et al., 2002] Cordeau, J.-F.; Gendreau, M.; Laporte, G.; Potvin, J.-Y. und Semet, F.: A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53 (2002), S.512-522.

[Cordeau und Laporte, 2002] Cordeau, J.-F. und Laporte, G.: Tabu search heuristics for the vehicle routing problem. Technical Report G-2002-15, University of Montreal, Montreal (Kanada), 2002.

[Cordeau et al., 2007] Cordeau, J.-F.; Laporte, G.; Savelsbergh, M. W. P. und Vigo, D.: Vehicle routing. In: Barnhart, C. und Laporte, G. (Hrsg.): Handbooks in operations research and management science - Volume 14 - Transportation. North Holland, Oxford (UK), 2007.

[Cordon et al., 2002] Cordon, O.; Herrera, F. und Stützle, T.: A review on the ant colony optimization metaheuristic: basis, models and new trends. *Mathware and Soft Computing*, 9 (2002), S.141-175.

[Corsten und Gössinger, 2002] Corsten, H. und Gössinger, R.: Advanced planning systems. *Zeitschrift für Planung*, 13 (2002) 1, S.99-105.

[Corsten und Gössinger, 2012] Corsten, H. und Gössinger, R.: Produktionswirtschaft - Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 13. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 2012.

[Croes, 1958] Croes, G. A.: A method for solving Traveling-Salesman problems. *Operations Research*, 6 (1958) 6, S.791-812.

[Croom et al., 2000] Croom, S.; Romano, P. und Giannakis, M.: Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6 (2000), S.67-83.

[Cross, 2000] Cross, G. J.: How e-business is transforming supply chain management. *Journal of Business Strategy*, 21 (2000) 2, S.36-39.

[Dangelmaier, 2001] Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2001.

[Dangelmaier, 2009] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Dantzig und Ramser, 1959] Dantzig, G. B. und Ramser, J. H.: The truck dispatching problem. *Management Science*, 6 (1959) 1, S.80-91.

[Dantzig und Wolfe, 1960] Dantzig, G. B. und Wolfe, P.: Decomposition principle for linear programming. *Operations Research*, 8 (1960) 1, S.101-111.

[Daugherty, 2011] Daugherty, P. J.: Review of logistics and supply chain relationship literature and suggested research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41 (2011) 1, S.16-31.

[Davis und Erlbaum, 1985] Davis, L. H. und Erlbaum, L.: Job shop scheduling with genetic algorithms. Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Pittsburgh (USA), 1985. S.136-140.

[Dawande et al., 2006] Dawande, M.; Geismar, H. N.; Hall, N. G. und Sriskandarajah, C.: Supply chain scheduling: Distribution systems. *Production and Operations Management*, 15 (2006) 2, S.243-261.

[Desrochers et al., 1990] Desrochers, M.; Lenstra, J. K. und Savelsbergh, M. W. P.: A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 46 (1990) 3, S.322-332.

[Dijkstra, 1970] Dijkstra, E. W.: Notes on structured programming. T. H.-Report 70-WSK-03, Technische Universität Eindhoven, Eindhoven (Niederlande), 1970.

[Dominic et al., 2004] Dominic, P. D. D.; Kaliyamoorthy, S. und Kumar, M. S.: Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24 (2004) 1, S.70-75.

[Domschke und Drexl, 2011] Domschke, W. und Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 8. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2011.

[Domschke und Scholl, 2006] Domschke, W. und Scholl, A.: Heuristische Verfahren. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2006.

[Domschke und Scholl, 2010] Domschke, W. und Scholl, A.: Logistik: Rundreisen und Touren. Oldenbourg Verlag, München, 2010.

[Dorigo et al., 1996] Dorigo, M.; Maniezzo, V. und Colorni, A.: The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, 26 (1996) 1, S.1-13.

[Dudek, 2009] Dudek, G.: Collaborative planning in supply chains. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2009.

[Dudek und Stadtler, 2005] Dudek, G. und Stadtler, H.: Negotiation-based collaborative planning between supply chain partners. *European Journal of Operational Research*, 163 (2005) 3, S.668-687.

[Duden, 2010] Dudenredaktion (Hrsg.): Duden - Das Fremdwörterbuch. 10. Auflage, Dudenverlag, Mannheim, u. a., 2010.

[Dueck und Scheuer, 1990] Dueck, G. und Scheuer, T.: Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 90 (1990) 1, S.161-175.

[Dyckhoff und Spengler, 2010] Dyckhoff, H. und Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft - Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. 3. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2010.

[Eksioglu, 2002] Eksioglu, S.: Optimizing integrated production inventory and distribution problems in supply chains. University of Florida, Gainesville (USA), Dissertation, 2002.

[Eksioglu et al., 2009] Eksioglu, B.; Vural, A. V. und Reisman, A.: The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57 (2009) 4, S.1472-1483.

[Erengüç et al., 1999] Erengüç, Ş. S.; Simpson, N. C. und Vakharia, A. J.: Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 115 (1999) 2, S.219-236.

[Erlach, 2013] Erlach, K.: Value stream design - The way to lean factory. Springer, Berlin u. a., 2013.

[Ester und Sander, 2000] Ester, M. und Sander, J.: Knowledge Discovery in Databases - Techniken und Anwendungen. Springer, Berlin u. a., 2000.

[Evers, 2002] Evers, K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Universität Hannover, Hannover, Dissertation, 2002.

[Federgruen und Zipkin, 1984] Federgruen, A. und Zipkin, P.: A combined vehicle routing and inventory allocation problem. *Operations Research*, 32 (1984) 5, S.1019-1037.

[Flood, 1956] Flood, M. M.: The Traveling-Salesman problem. *Operations Research*, 4 (1956) 1, S.61-75.

[Florian et al., 2010] Florian, M.; Kemper, J.; Sihn, W. und Hellingrath, B.: Concept of transport-oriented scheduling for reduction of inbound logistics traffic. Proceedings of the 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2010, Wien (Österreich), 2010. S.101-109.

[Fomundam und Herrmann, 2009] Fomundam, S. und Herrmann, J. W.: Solution techniques for continuous replenishment inventory routing problems. ISR Technical Report, Institute for Systems Research at the University of Maryland, College Park Maryland (USA), 2009.

[Friedrich, 2007] Friedrich, S.: Verfahren für die taktische Planung der Supply Chain. Shaker Verlag, Aachen, 2007.

[Friedrich und List, 2009] Friedrich, S. und List, S.: Supply Chain Kooperation in der Ersatzteillogistik für die Luftfahrt. In: Voß, S.; Pahl, J. und Schwarze, S. (Hrsg.): Logistik Management - Systeme, Methoden, Integration. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Frohlich und Westbrook, 2001] Frohlich, M. T. und Westbrook, R.: Arcs of integration: an international study of supply chain strategies. *Journal of Operations Management*, 19 (2001), S.185-200.

[Fumero und Vercellis, 1999] Fumero, F. und Vercellis, C.: Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules. *Transportation Science*, 33 (1999) 3, S.330-340.

[Funke, 2003] Funke, B.: Effiziente Lokale Suche für Vehicle Routing und Scheduling Probleme mit Ressourcenbeschränkungen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, Dissertation, 2003.

[Garey et al., 1976] Garey, M. R.; Johnson, D. S. und Sethi, R.: The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1 (1976) 2, S.117-129.

[Geismar et al., 2008] Geismar, H. N.; Laporte, G.; Lei, L. und Sriskandarajah, C.: The integrated production and transportation scheduling problem for a product with a short lifespan. *Journal on Computing*, 20 (2008) 1, S.21-33.

[Gendreau und Potvin, 2010] Gendreau, M. und Potvin, J.-Y. (Hrsg.): Handbook of metaheuristics. 2. Auflage, Springer, New York (USA) u. a., 2010.

[Gharbi und Haouari, 2002] Gharbi, A. und Haouari, M.: Minimizing makespan on parallel machines subject to release dates and delivery times. *Journal of Scheduling*, 5 (2002) 4, S.329-355.

[Gillet und Miller, 1974] Gillett, B. und Miller, L.: A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*, 22 (1974) 2, S.340-349.

[Gleißner und Femerling, 2012] Gleißner, H. und Femerling, J. C.: Logistik - Grundlagen – Übungen – Fallbeispiele. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.

[Glover et al., 1979] Glover, F.; Jones, G.; Karney, D.; Klingman, D. und Mote, J.: An integrated production, distribution, and inventory planning system. *Interfaces*, 9 (1979) 5, S.21-35.

[Glover und Laguna, 1997] Glover, F.; Jones, G.; Karney, D.; Klingman, D. und Mote, J.: An integrated production, distribution, and inventory planning system. *Interfaces*, 9 (1979) 5, S.21-35.

[Golden et al., 2008] Golden, B.; Raghavan, S. und Wasil, E. (Hrsg.): The vehicle routing prolem - Latest advances and new challenges. Springer, New York (USA), 2008.

[Gottlieb et al., 2003] Gottlieb, J.; Puchta, M. und Solnon, C.: A study of greedy, local search, and ant colony optimization approaches for car sequencing problems. Proceedings of the 2003 international conference on Applications of evolutionary computing, Essex (UK), 2003. S.246-257.

[Graham et al., 1979] Graham, R. L.; Lawler, E. L.; Lenstra, J. K. und Kan, A. H. G. R.: Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5 (1979), S.287-326.

[Grünert und Irnich, 2005] Grünert, T. und Irnich, S.: Optimierung im Transport - Band I: Grundlagen. Shaker Verlag, Aachen, 2005.

[Grünert und Irnich, 2005a] Grünert, T. und Irnich, S.: Optimierung im Transport - Band II: Wege und Touren. Shaker Verlag, Aachen, 2005.

[Gudehus, 2010] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Stragtegien - Anwendungen. 4. Auflage, Springer, Heidelberg u. a., 2010.

[Günther und Tempelmeier, 2012] Günther, H.-O. und Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 9. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2012.

[Hall und Potts, 2003] Hall, N. G. und Potts, C. N.: Supply chain scheduling: Batching and delivery. *Operations Research*, 51 (2003) 4, S.566-584.

[Hall und Shmoys, 1992] Hall, L. A. und Shmoys, D. B.: Jackson's rule for single-machine scheduling: Making a good heuristic better. *Mathematics of Operations Research*, 17 (1992) 1, S.22-35.

[Haupt, 1989] Haupt, R.: A survey of priority rule-based scheduling. *OR Spectrum*, 11 (1989) 1, S.3-16.

[Helsgaun, 2000] Helsgaun, K.: An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. Writings on computer science, Roskilde University, Roskilde (Dänemark), 2000.

[Henning, 2002] Henning, A.: Praktische Job-Shop Scheduling-Probleme. Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Dissertation, 2002.

[Hermes et al., 2009] Hermes, A.; Preuß, M.; Wagenitz, A. und Hellingrath, B.: Integrierte Produktions- und Transportplanung in der Automobilindustrie zur Steigerung der ökologischen Effizienz. Proceedings der 14. Magdeburger Logistik-Tagung, Magdeburg, 2009. S.183-195.

[Hertel et al., 2011] Hertel, J.; Zentes, J. und Schramm-Klein, H.: Supply Chain Management und Warenwirtschaftsysteme im Handel. Springer, Dordrecht (Niederlande) u. a., 2011.

[Hirthammer und Riha, 2005] Hirthammer, K. und Riha, I. V.: Framework for cost-benefit-sharing in logistics networks. Proceedings of the Frontiers of e-Business Research 2005, Tampere (Finnland), 2005.

[Ho und Tay, 2005] Ho, N. B. und Tay, J. C.: Evolving dispatching rules for solving the flexible job-shop problem. Proceedings of The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2005), Edinburgh (UK), 2005. S.2848-2855.

[Holmgren, 2010] Holmgren, J.: On the integration of optimization and agent technology for transportation and production planning. Blekinge Institute of Technology, Karlskrona (Schweden), Dissertation, 2010.

[Holthaus, 1996] Holthaus, O.: Ablaufplanung bei Werkstattfertigung. Universtät Paderborn, Paderborn, Dissertation, 1996.

[Holthaus und Rajendran, 1997] Holthaus, O. und Rajendran, C.: New dispatching rules for scheduling in a job shop - an experimental study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13 (1997) 2, S.148-153.

[Holthaus und Rajendran, 1997a] Holthaus, O. und Rajendran, C.: Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*, 48 (1997) 1, S.87-105.

[Hombergs und Riha, 2008] Hombergs, J. und Riha, I. V.: Technical Report 08001 - Softwareauswahl für den Einsatz von Cost Benefit Sharing in Logistiknetzwerken. Sonderforschungsbereich 559 - Modellierung großer Netze in der Logistik, Universität Dortmund und Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund, 2008.

[Hoogeveen und Vestjens, 2000] Hoogeveen, J. A. und Vestjens, A. P. A.: A best possible deterministic on-line algo-rithm for minizing maximum delivery time on a single machine. *Journal on Discrete Mathematics*, 13 (2000) 1, S.56-63.

[Hord, 1981] Hord, S. M.: Working together: cooperation or collaboration?. Research and Development Center for Teacher Education, Austin (USA), 1981.

[Huang und Zhang, 1994] Huang, S. H. und Hong-Chao, Z.: Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A*, 17 (1994) 2, S.212-228.

[Jain und Meeran, 1998] Jain, A. S. und Meeran, S.: A state-of-the-art review of job-shop scheduling techniques. Department of Applied Physics, Electronic and Mechanical Engineering at the University of Dundee, Dundee (UK), 1998.

[Jayamohan und Rajendran, 2000] Jayamohan, M. S. und Rajendran, C.: New dispatching rules for shop scheduling: A step forward. *International Journal of Production Research*, 38 (2000) 3, S.563-586.

[Jayamohan und Rajendran, 2000a] Jayamohan, M. S. und Rajendran, C.: A comparative analysis of two different approaches to scheduling in flexible flow shops. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 11 (2000) 6, S.572-580.

[Jayamohan und Rajendran, 2004] Jayamohan, M. S. und Rajendran, C.: Development and analysis of cost-based dispatching rules for job shop scheduling. *European Journal of Operational Research*, 157 (2004) 2, S.307-321.

[Jodlbauer, 2008] Jodlbauer, H.: Produktionsoptimierung. 2. Auflage, Springer, Wien u. a., 2008.

[Johnson und McGeoch, 1997] Johnson, D. S. und McGeoch, L. A.: The Traveling Salesman Problem: A Case Study. In: Aarts, E. H. L. und Lenstra, J. K. (Hrsg.): Local Search in Combinatorial Optimization. Wiley and Sons, New York (USA), 1997.

[Johnson und McGeoch, 2002] Johnson, D. S. und McGeoch, L. A.: Experimental analysis of heuristics for the STSP. In: Gutin, G. und Punnen, A. P. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem and its Variations. Kluwer Academic Publishers, Boston (USA), 2002.

[Junge, 2007] Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Universität Kassel, Kassel, Dissertation, 2007.

[Kaminsky, 2003] Kaminsky, P.: The effectiveness of the longest delivery time rule for the flow shop delivery time problem. *Naval Research Logistics*, 50 (2003) 3, S.257-272.

[Kämpf, 2006] Kämpf, M.: Probleme der Tourenbildung. Chemnitzer Informatik-Berichte, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2006.

[Karger et al., 2010] Karger, D.; Stein, C. und Wein, J.: Scheduling algorithms. In: Atallah, M. J. und Blanton, M. (Hrsg.): Algorithms and theory of computation handbook. 2. Auflage, CRC Press, Boca Raton (USA), 2010.

[Kemppainen, 2005] Kemppainen, K.: Priority scheduling revisited - dominant rules, open protocolls, and integrrated order management. Helsinki School of Economics, Helsinki (Finland), Dissertation, 2005.

[Kilger et al., 2008] Kilger, C.; Reuter, B. und Stadtler, H.: Collaborative planning. In: Stadtler, H. und Kilger, C. (Hrsg.): Supply chain management and advanced planning - Concepts, models, software, and case studies. 4. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2008.

[Kim, 1990] Kim, Y.-D.: A comparison of dispatching rules for job shops with multiple identical jobs and alternative routeings. *International Journal of Production Research*, 28 (1990) 5, S.953-962.

[Kirkpatrick, 1984] Kirkpatrick, S.: Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of Statistical Physics*, 34 (1984) 5, S.975-986.

[Kirkpatrick et al., 1983] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D. und Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (1983) 4598, S.671-680.

[Korte und Vygen, 2012] Korte, B. und Vygen, J.: Kombinatorische Optimierung - Theorie und Algorithmen. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2012.

[Krapfel et al., 1991] Krapfel, R. E.; Salmond, D. und Spekman, R.: A strategic approach to managing buyer-seller relationships. *European Journal of Marketing*, 25 (1991) 9, S.22-37.

[Kreipl und Pinedo, 2004] Kreipl, S. und Pinedo, M. L.: Planning and scheduling in supply chains: An overview of issues in practice. *Production and Operations Management*, 13 (2004) 1, S.77-92.

[Kuhn, 1955] Kuhn, H. W.: The hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 2 (1955) 1-2, S.83-97.

[Kuhn und Hellingrath, 2003] Kuhn, A. und Hellingrath, B.: Auftragsmanagement in Netzwerken: Supply Chain Management. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Kurbel, 2005] Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 2005.

[Kutanoglu und Sabuncuoglu, 1999] Kutanoglu, E. und Sabuncuoglu, I.: An analysis of heuristics in a dynamic job shop with weighted tardiness objectives. *International Journal of Production Research*, 37 (1999) 1, S.165-187.

[Lancioni et al., 2000] Lancioni, R. A.; Smith, M. F. und Oliva, T. A.: The role of the internet in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29 (2000), S.45-56.

[Laporte, 1992] Laporte, G.: The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59 (1992) 3, S.345-358.

[Laporte, 2009] Laporte, G.: Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43 (2009) 4, S.408-416.

[Laporte et al., 2000] Laporte, G.; Gendreau, M.; Potvin, J. Y. und Semet, F.: Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 7 (2000) 4-5, S.285-300.

[Laporte und Nobert, 1987] Laporte, G. und Nobert, Y.: Exact algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Discete Mathemetics*, 31 (1987), S.147-187.

[Laporte und Osman, 1995] Laporte, G. und Osman, I. H.: Routing problems: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 61 (1995) 1, S.227-262.

[Law, 2003] Law, A. M.: How to conduct a successful simulation study. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (WSC'03), New Orleans (USA), 2003. S.66-70.

[Law, 2007] Law, A. M.: Simulation modelling and analysis. McGraw-Hill New York (USA) u. a., 2007.

[Lawler et al., 1993] Lawler, E. L.; Lenstra, J. K.; G., R. K. A. H. und Shmoys, D. B.: Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. In: Graves, S. C.; Rinnooy Kan, A. H. G. und Zipkin, P. (Hrsg.): Handbooks in operations research and management science - Volume 4 - Logistics of production and inventory. North Holland, Amsterdam, 1993.

[Lee et al., 2008] Lee, B. K.; Kang, K. H. und Lee, Y. H.: Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network. *Computers & Industrial Engineering*, 54 (2008) 4, S.945-959.

[Lenstra und Rinnooy Kan, 1979] Lenstra, J. K. und Rinnooy Kan, A. H. G.: Computational complexity of discrete optimization problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 4 (1979), S.121-140.

[Lenstra et al., 1977] Lenstra, J. K.; Rinnooy Kan, A. H. G. und Brucker, P.: Complexity of machine scheduling problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1 (1977), S.343-362.

[Li et al., 2005] Li, K.; Ganesan, V. und Sivakumar, A.: Synchronized scheduling of assembly and multi-destination airtransportation in a consumer electronics supply chain. *International Journal of Production Research*, 43 (2005) 13, S.2671-2685.

[Li und Vairaktarikis, 2007] Li, C.-L. und Vairaktarakis, G. L.: Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations. *IIE Transactions*, 39 (2007) 2, S.203-215.

[Li et al., 2005a] Li, C.-L.; Vairaktarakis, G. L. und Lee, C.-Y.: Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations. *European Journal of Operational Research*, 164 (2005) 1, S.39-51.

[Li und Yuan, 2009] Li, S. und Yuan, J.: Scheduling with families of jobs and delivery coordination under job availability. *Theoretical Computer Science*, 410 (2009) 47-49, S.4856-4863.

[Liebl, 1995] Liebl, F.: Simulation: Problemorientierte Einführung. 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 1995.

[Lin, 1965] Lin, S.: Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*, 44 (1965), S.2245-2269.

[Lin und Kernighan, 1973] Lin, S. und Kernighan, B. W.: An effective heuristic algorithm for the travelling-salesman problem. *Operations Research*, 21 (1973) 2, S.498-516.

[Liu, 2003] Liu, S.: On the integrated production, inventory and distribution routing problem. The State University of New Jersey, Newark (USA), Dissertation, 2003.

[Liu und Cheng, 2002] Liu, Z. und Cheng, T. C. E.: Scheduling with job release dates, delivery times and preemption penalties. *Information Processing Letters*, 82 (2002), S.107-111.

[Looi, 1992] Looi, C.-K.: Neural network methods in combinatorial optimization. *Computers & Operations Research*, 19 (1992) 3–4, S.191-208.

[Lourenco, 2005] Lourenco, H. R.: Logistics management - An opportunity for metaheuristics. In: Rego, C. und Alidaee, B. (Hrsg.): Metaheuristic optimization via memory and evolution - Tabu search and scatter search. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Niederlande), 2005.

[LUNDGREN] LUNDGREN - TSPSEARCH. The MathWorks Inc., Natick (USA), http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35178-tspsearch/content/tspsearch.m, letzter Zugriff: 13.12.2012.

[Magnus, 2007] Magnus, K.-H.: Erfolgreiche Supply-Chain-Kooperation zwischen Einzelhandel und Konsumgüterherstellern - Eine empirische Untersuchung der Händlerperspektive. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007.

[Marinakis und Migdalas, 2002] Marinakis, Y. und Migdalas, A.: Heuristic solutions of vehicle routing problems in supply chain management. In: Pardalos, P. M.; Migdalas, A. und Burkard, R. (Hrsg.): Combinatorial and global optimization. World Scientific Publishing Co., 2002.

[Martin et al., 1993] Martin, C. H.; Dent, D. C. und Eckhart, J. C.: Integrated production, distribution, and inventory planning at Libbey-Owens-Ford. *Interfaces*, 23 (1993) 3, S.68-78.

[Mastrolilli, 2003] Mastrolilli, M.: Efficient approximation schemes for scheduling problems with release dates and delivery times. *Journal of Scheduling*, 6 (2003) 6, S.521-531.

[Mathirajan und Sivakumar, 2006] Mathirajan, M. und Sivakumar, A. I.: A literature review, classification and simple meta-analysis on scheduling of batch processors in semiconductor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (2006) 9, S.990-1001.

[MATLAB] Matlab - Version R2007b. The MathWorks Inc., Natick (USA), http://www.mathworks.de.

[MATLOG] Matlog - Logistics Engineering Matlab Toolbox. North Carolina State University - Department of Industrial and Systems Engineering, Raleigh (USA), http://www.ise.ncsu.edu/kay/matlog/.

[Mattfeld, 2005] Mattfeld, D. C.: IT-Integration of terminal operations planning. In: Günther, H.-O.; Mattfeld, D. C. und Suhl, L. (Hrsg.): Supply Chain Management und Logistik - Optimierung, Simulation, Decision Support. Physica Verlag, Heidelberg, 2005.

[Mattfeld, 2006] Mattfeld, D. C.: The management of transshipment terminals - Decision support for terminal operations in finished vehicle supply chains. Springer, New York (USA), 2006.

[Mattfeld und Bierwirth, 1998] Mattfeld, D. C. und Bierwirth, C.: Minimizing job tardiness: Priority rules vs. adaptive scheduling. Proceedings of the 3rd International Conference on Adaptive Computing in Design and Manufacture, Devin (UK), 1998. S.59-67.

[Mattfeld und Huth, 2009] Mattfeld, D. C. und Huth, T.: Integrationskonzepte für das taktische und operationale Management von Ladungsträgern. In: Voß, S.; Pahl, J. und Schwarze, S. (Hrsg.): Logistik Management: Systeme, Methoden, Integration. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Mattfeld und Vahrenkamp, 2014] Mattfeld, D. C. und Vahrenkamp, R.: Logistiknetzwerke - Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2014.

[Mazdeh et al., 2007] Mazdeh, M. M.; Sarhadi, M. und Hindi, K. S.: A branch-and-bound algorithm for single-machine scheduling with batch delivery minimizing flow times and delivery costs. *European Journal of Operational Research*, 183 (2007) 1, S.74-86.

[Mazdeh et al., 2008] Mazdeh, M. M.; Sarhadi, M. und Hindi, K. S.: A branch-and-bound algorithm for single-machine scheduling with batch delivery and job release times. *Computers and Operations Research*, 35 (2008) 4, S.1099-1111.

[Mehrjerdi, 2009] Mehrjerdi, Y. Z.: The collaborative supply chain. *Assembly Automation*, 29 (2009) 2, S.127-136.

[Meinecke und Scholz-Reiter, 2013] Meinecke, C. und Scholz-Reiter, B.: Klassifikation von Verfahren zur Lösung des integrierten Planungsproblems von Produktion und Transport. Industrie Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse, 29 (2013) 6, S.57-60.

[Meinecke und Scholz-Reiter, 2014] Meinecke, C. und Scholz-Reiter, B.: A heuristic for the integrated production and distribution scheduling problem. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8 (2014) 2, S.74-81.

[Meinecke und Scholz-Reiter, 2014a] Meinecke, C. und Scholz-Reiter, B.: A representation scheme for integrated production and outbound distribution models. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 18 (2014) 3, S. 283-301.

[Mentzer et al., 2001] Mentzer, J. T.; DeWitt, W.; Keebler, J. S.; Min, S.; Nix, N. W.; Smith, C. D. und Zacharia, Z. G.: Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22 (2001) 2, S.1-25.

[Min et al., 2005] Min, S.; Roath, A. S.; Daugherty, P. J.; Genchev, S. E.; Chen, H.; Arndt, A. D. und Richey, R. G.: Supply chain collaboration: what's happening?. *The International Journal of Logistics Management*, 16 (2005) 2, S.237-256.

[Mizrak und Bayhan, 2006] Mizrak, P. und Bayhan, G. M.: Comparative study of dispatching rules in a real-life job shop environment. *Applied Artificial Intelligence*, 20 (2006) 7, S.585-607.

[Moharana et al., 2012] Moharana, H. S.; Murty, J. S.; Senapati, S. K. und Khuntia, K.: Coordination, collaboration and integration for supply chain management. *International Journal of Interscience Management Review*, 2 (2012) 2, S.46-50.

[Moscato und Fontanari, 1990] Moscato, P. und Fontanari, J. F.: Stochastic versus deterministic update in simulated annealing. *Physics Letters A*, 146 (1990) 4, S.204-208.

[Mula et al., 2010] Mula, J.; Peidro, D.; Díaz-Madroñero, M. und Vicens, E.: Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204 (2010) 3, S.377-390.

[Müller und Riedel, 2006] Müller, E. und Riedel, R.: Stabilisierung und Nachhaltigkeit von Netzwerken. Proceedings of net's work 2006, Bielefeld, 2006. S.19-29.

[Naslund und Williamson, 2010] Naslund, D. und Williamson, S.: What is management in supply chain management? - A critical review of definitions, frameworks and terminology. *Journal of Management Policy and Practice*, 11 (2010) 4, S.11-28.

[Neidhardt, 2007] Neidhardt, U.: Einsatz von Prioritätsregeln zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen. Shaker Verlag, Aachen, 2007.

[Ohrt, 2008] Ohrt, C.: Tourenplanung im Straßengüterverkehr. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008.

[O'Leary-Kelly und Flores, 2002] O'Leary-Kelly, S. und Flores, B. E.: The integration of manufacturing and marketing/sales decisions: impact on organizational performance. *Journal of Operations Management*, 20 (2002), S.221-240.

[Otto und Kotzab, 2001] Otto, A. und Kotzab, H.: Der Beitrag des Supply Chain Management zum Management von Supply Chains - Überlegungen zu einer unpopulären Frage. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 53 (2001) 3, S.157-176.

[Page, 2001] Page, B.: Diskrete Simulation: eine Einführung mit Modula-2. Springer, Berlin, 2001.

[Panwalkar und Iskander, 1977] Panwalkar, S. S. und Iskander, W.: A survey of scheduling rules. *Operations Research*, 25 (1977) 1, S.45-61.

[Park, 2005] Park, Y. B.: An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43 (2005) 6, S.1205-1224.

[Pereira und Tavares, 2009] Pereira, F. B. und Tavares, J. (Hrsg.): Bio-inpired algorithms for the vehicle routing problem. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Pfohl, 2000] Pfohl, H.-C.: Supply Chain Management: Konzept, Trends, Strategien. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Supply Chain Management: Logistik Plus?. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2000.

[Pfohl, 2010] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2010.

[Pinedo, 2012] Pinedo, M. L.: Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems. 4. Auflage, Springer, New York (USA), 2012.

[Potts, 1980] Potts, C. N.: Analysis of a heuristic for one machine sequencing with release dates and delivery times. *Operations Research*, 28 (1980) 6, S.1436-144.

[Preuss und Hellingrath, 2010] Preuss, M. und Hellingrath, B.: Tactical planning of sustainable transportation by logistics service providers for the automotive industry. Proceedings of the 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2010, Wien (Österreich), 2010. S.252-262.

[Psaraftis, 1995] Psaraftis, H. N.: Dynamic vehicle routing: Status and prospects. *Annals of Operations Research*, 61 (1995) 1, S.143-164.

[Pundoor und Chen, 2005] Pundoor, G. und Chen, Z. L.: Scheduling a production-distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost. *Naval Research Logistics*, 52 (2005) 6, S.571-589.

[Rabe et al., 2008] Rabe, M.; Spieckermann, S. und Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Springer, Berlin u. a., 2008.

[Rajendran und Holthaus, 1999] Rajendran, C. und Holthaus, O.: A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*, 116 (1999) 1, S.156-170.

[Ramasesh, 1990] Ramasesh, R.: Dynamic job shop scheduling: A survey of simulation research. Omega International Journal of Management Science, 18 (1990) 1, S.43-57.

[Rego und Glover, 2007] Rego, C. und Glover, F.: Local search and metaheuristics. In: Gutin, G. und Punnen, A. P. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem and Its Variations. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Niederlande), 2007.

[Reinelt, 1994] Reinelt, G.: The Traveling Salesman - Computational solutions for TSP applications. Springer, Berlin u. a., 1994.

[Richter, 2005] Richter, A.: Dynamische Tourenplanung - Modifikation von klassischen Heuristiken für das Dynamische Rundreiseproblem (DTSP) und das Dynamische Tourenplanungsproblem (DVRP) mit der Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges. Technische Universität Dresden, Dresden, Dissertation, 2005.

[Rieck, 2008] Rieck, J.: Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen - Modelle und Methoden. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008.

[Riedel und Müller, 2006] Riedel, R. und Müller, E.: Mastering globalization – Meeting new challenges for planning and operations management. Proceedings of the 16th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2006), Limerick (Irland), 2006. S.939-946.

[Riha, 2009] Riha, I. V.: Kosten- und leistungsoptimierter Betrieb kooperativer Logistiknetzwerke. In: Buchholz, P. und Clausen, U. (Hrsg.): Große Netze der Logistik - Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559. Springer, Berlin u. a., 2009.

[Rohde et al., 2000] Rohde, J.; Meyr, H. und Wagner, M.: Die Supply Chain Planning Matrix. *PPS Management*, 5 (2000) 1, S.10-15.

[Rose, 2002] Rose, O.: Some issues of the critical ratio dispatch rule in semiconductor manufacturing. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC'02), San Diego (USA), 2002. S.1401-1405.

[Ruiz-Torres und Tyworth, 1997] Ruiz-Torres, A. J. und Tyworth, J. E.: Simulation based approach to study the interaction of scheduling and routing on a logistic network. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC'97), Atlanta (USA), 1997. S.1189-1194.

[Sabuncuoglu, 1998] Sabuncuoglu, I.: Scheduling with neural networks: A review of the literature and new research directions. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 9 (1998) 1, S.2-12.

[Sachan und Datta, 2005] Sachan, A. und Datta, S.: Review of supply chain management and logistics research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 35 (2005) 9, S.664-705.

[Sargent, 2010] Sargent, R. G.: Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC'10), Baltimore (USA), 2010. S.166-183.

[Sarmiento und Nagi, 1999] Sarmiento, A. M. und Nagi, R.: A review of integrated analysis of production-distribution systems. *IIE Transactions on Scheduling and Logistics - Special Issue on Manufacturing Logistics*, 31 (1999), S.1061-1074.

[Schmidt und Makalic, 2009] Schmidt, D. F. und Makalic, E.: Universal models for exponential distribution. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55 (2009) 7, S.3087-3090.

[Schneeweiss und Zimmer, 2004] Schneeweiss, C. und Zimmer, K.: Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain. *European Journal of Operational Research*, 153 (2004) 3, S.687-703.

[Schneider et al., 2010] Schneider, H. M.; Buzacott, J. A. und Rücker, T.: Operative Produktionsplanung und -steuerung - Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen. Oldenbourg Verlag, München u. a., 2010.

[Scholz-Reiter et al., 2008] Scholz-Reiter, B.; Böse, F.; Dizdar, C. und Windt, K.: Transportorientierte Reihenfolgeplanung. *PPS Management*, 13 (2008) 4, S.15-17.

[Scholz-Reiter et al., 2012] Scholz-Reiter, B.; Dashkowskiy, S.; Görges, M.; Jagalski, T. und Naujok, L.: Autonomous Decision Policies for Networks of Production Systems. In: Armbruster, D. und Kempf, K. G. (Hrsg.): Decision Policies for Production Networks. Springer, London u. a., 2012.

[Scholz-Reiter et al., 2010b] Scholz-Reiter, B.; Heger, J.; Meinecke, C.; Rippel, D.; Zolghadri, M. und Rasoulifar, R.: Supporting non-hierarchical supply chain networks in the electronics industry. Proceedings of The 16th International Conference on Concurrent Enterprising, Lugano (Schweiz), 2010.

[Scholz-Reiter et al., 2011c] Scholz-Reiter, B.; Makuschewitz, T.; Novaes, A. G. N.; Frazzon, E. M. und Lima Junior, O. F.: An approach for the sustainable integration of production and transportation scheduling. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 10 (2011) 2, S.158-179.

[Scholz-Reiter und Meinecke, 2011] Scholz-Reiter, B. und Meinecke, C.: Nutzen von Informationstransparenz im Seehafenterminal. *Productivity Management*, 16 (2011) 4, S.56-58.

[Scholz-Reiter und Meinecke, 2013] Scholz-Reiter, B. und Meinecke, C.: Towards an Integrated Production and Outbound Distribution Planning Method. In: Kreowski, H.-J.; Scholz-Reiter, B. und Thoben, K.-D. (Hrsg.): Dynamics in Logistics. Third International Conference, LDIC 2012. Wiley, Berlin u. a., 2013.

[Scholz-Reiter et al., 2010] Scholz-Reiter, B.; Meinecke, C. und Ruthenbeck, C.: Planungsmethode für die unternehmensübergreifende Auftragsabwicklung. *Industrie Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse*, 26 (2010) 5, S.39-42.

[Scholz-Reiter et al., 2009] Scholz-Reiter, B.; Meinecke, C. und Ruthenbeck, C.: Development of a cross-company planning and scheduling method for the supply chain management of RoRo and ConRo-ports. Proceedings of the 1st International Conference on Logistics and Transport, Chiang Mai (Thailand), 2009.

[Scholz-Reiter et al., 2008a] Scholz-Reiter, B.; Rekersbrink, H.; Wenning, B.-L. und Makuschewitz, T.: A survey of autonomous control algorithms by means of adapted vehicle routing. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA 08), Haifa (Israel), 2008.

[Scholz-Reiter et al., 2011b] Scholz-Reiter, B.; Rippel, D. und Meinecke, C.: Identification of requirements towards a business information tool. In: Cruz-Cunha, M. M.; Varajão, J.; Powell, P. und Martinho, R. (Hrsg.): Enterprise Information Systems - Part I. Springer, Heidelberg, 2011.

[Scholz-Reiter et al., 2011a] Scholz-Reiter, B.; Schwindt, C.; Frazzon, E. M. und Makuschewitz, T.: An approach to negotiation-based alignment of manufacturing and transportation systems along global production networks. Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Madison (USA), 2011.

[Scholz-Reiter et al., 2010a] Scholz-Reiter, B.; Schwindt, C.; Makuschewitz, T. und Frazzon, E. M.: An approach for the integration of production scheduling and inter-facility transportation within global supply chains. Proceedings of the 21th Annual Conference of the Production and Operations Management Society (POMS2010) - Operations in Emerging Economies, Vancouver (Canada), 2010.

[Schönsleben, 2011] Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement - Operations und Supply Chain Management in umfassenden Wertschöpfungsnetzwerken. 6. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2011.

[Schuh und Gierth, 2006] Schuh, G. und Gierth, A.: Aachener PPS-Modell. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. 3. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2006.

[Schuh et al., 2003] Schuh, G.; Kurr, M. und Friedli, T.: Das Konzept "Virtuelle Fabrik" - Aufbau, Betrieb und Auflösung. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Schuh und Stich, 2012] Schuh, G. und Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1 - Grundlagen der PPS. 4. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2012.

[Sels et al., 2011] Sels, V.; Gheysen, N. und Vanhoucke, M.: A comparison of priority rules for the job shop scheduling problem under different flow time- and tardiness-related objective functions. *International Journal of Production Research*, 50 (2011) 15, S.4255-4270.

[Sharp et al., 1970] Sharp, J. F.; Snyder, J. C. und Greene, J. H.: A decomposition algorithm for solving the multifacility production-transportation problem with nonlinear production costs. *Econometrica*, 38 (1970) 3, S.490-506.

[Shtovba, 2005] Shtovba, S. D.: Ant algorithms: theory and applications. *Programming and Computer Software*, 31 (2005) 4, S.167-178.

[Simatupang, et al., 2002] Simatupang, T. M.; Wright, A. C. und Sridharan, R.: The knowledge of coordination for supply chain integration. *Business Process Management Journal*, 8 (2002) 3, S.289-308.

[Singhal et al., 1989] Singhal, J.; Marsten, R. E. und Morin, T. L.: Fixed Order Branch-and-Bound Methods for Mixed-Integer Programming: The ZOOM System. *Journal on Computing*, 1 (1989) 1, S.44-51.

[Smith, 1999] Smith, K. A.: Neural networks for combinatorial optimization: A review of more than a decade of research. *Journal on Computing*, 11 (1999) 1, S.15-34.

[Smith et al., 1995] Smith, K. G.; Carroll, S. J. und Ashford, S. J.: Intra- and interorganizational cooperation: towards a research agenda. *Academy of Management Journal*, 38 (1995) 1, S.7-23.

[Stadtler, 2005] Stadtler, H.: Supply chain management and advanced planning - basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163 (2005) 3, S.575-588.

[Stadtler, 2008] Stadtler, H.: Supply Chain Management – An Overview. In: Stadtler, H. und Kilger, C. (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning - Concepts, Models, Software, and Case Studies. 4. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2008.

[Stadtler, 2009] Stadtler, H.: A framework for collaborative planning and state-of-the-art. *OR Spectrum*, 31 (2009) 1, S.5-30.

[Stecke und Zhao, 2007] Stecke, K. E. und Zhao, X.: Production and transportation integration for a make-to-order manufacturing company with a commit-to-delivery business mode. *Manufacturing Service Operations Management*, 9 (2007) 2, S.206-224.

[Stefenelli, 2000] Stefenelli, M.: Kostenorientierte Reihenfolgeplanung durch Verknüpfung von Prioritätsregeln mit lokalen Suchverfahren. Universität Passau, Passau, Dissertation, 2000.

[Steiglitz und Weiner, 1968] Steiglitz, K. und Weiner, P.: Some improved algorithms for computer solution of the traveling salesman problem. Proceedings 6th Ann. Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing, Urbana (USA), 1968. S.814-821.

[Strack, 2012] Strack, G.: An integrated decision making process: An application on inventory, warehouse, production and distribution decisions. Universite catholique de Louvain - Louvain School of Management, Louvain-la-Neuve (Belgien), Dissertation, 2012.

[Strassner, 2005] Strassner, M.: RFID im Supply Chain Management - Auswirkungen und Handlungsempfehlungen am Beispiel der Automobilindustrie. Universität St. Gallen, St. Gallen (Schweiz), Dissertation, 2005.

[Sucky, 2004] Sucky, E.: Koordination in Supply Chains - Spieltheoretische Ansätze zur Ermittlung integrierter Bestell- und Produktionspolitiken. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2004.

[Suhl und Mellouli, 2013] Suhl, L. und Mellouli, T.: Optimierungssysteme - Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2013.

[Tan et al., 2000] Tan, G. W.; Shaw, M. J. und Fulkerson, B.: Web-based supply chain management. *Information Systems Frontiers*, 2 (2000) 1, S.41-55.

[Teichner, 2010] Teichner, M.: Analyse der Wirksamkeit ausgewählter Verfahren der Reihenfolgeplanung für die Erreichung ökonomischer Zielstellungen. Shaker Verlag, Aachen, 2010.

[Thomas und Griffin, 1996] Thomas, D. J. und Griffin, P. M.: Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94 (1996) 1, S.1-15.

[Toth und Vigo, 2002] Toth, P. und Vigo, D. (Hrsg.): The vehicle routing problem. SIAM, Philadelphia (USA), 2002.

[Turkulainen und Ketokivi, 2012] Turkulainen, V. und Ketokivi, M.: Cross-functional integration and performance: what are the real benefits?. *International Journal of Operations & Production Management*, 32 (2012) 4, S.447-467.

[Ullrich, 2013] Ullrich, C. A.: Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows. *European Journal of Operational Research*, 227 (2013) 1, S.152-165.

[Vaessens et al., 1994] Vaessens, R. J. M.; Aarts, E. H. L. und Lenstra, J. K.: Job shop scheduling by local search. *Journal on Computing*, 8 (1994) 3, S.302-317.

[Vahrenkamp et al., 2012] Vahrenkamp, R.; Kotzab, H. und Siepermann, C.: Logistik - Management und Stragtegien. 7. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 2012.

[Vahrenkamp, 2008] Vahrenkamp, R.: Produktionsmanagement. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 2008.

[van den Akker et al., 2000] van den Akker, M.; Hoogeveen, H. und Vakhania, N.: Restarts can help in the on-line minimization of the maximum delivery time on a single machine. Proceedings of the 8th Annual European Symposium on Algorithms (ESA2000), Saarbrücken, 2000. S.427-436.

[van Laarhoven et al., 1992] van Laarhoven, P. J. M.; Aarts, E. H. L. und Lenstra, J. K.: Job shop scheduling by simulated annealing. *Operations Research*, 40 (1992) 1, S.113-125.

[VDI, 2000] VDI - Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss und Logistik, Entwurf zur VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Beuth Verlag, Berlin, 2000.

[Vidal und Goetschalckx, 1997] Vidal, C. J. und Goetschalckx, M.: Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98 (1997) 1, S.1-18.

[Völker und Neu, 2008] Völker, R. und Neu, J.: Supply Chain Collaboration - Kollaborative Logistikkonzepte für Third- und Fourth-Tier-Zulieferer. Physica Verlag, Heidelberg, 2008.

[Waikar et al., 1995] Waikar, A. M.; Sarker, B. R. und Lal, A. M.: A comparative study of some priority dispatching rules under different shop loads. *Production Planning & Control*, 6 (1995) 4, S.301-310.

[Wang, 2012] Wang, D.: Integrated scheduling of production and transportation operations with stage-dependent inventory costs and due dates considerations. Universite de technologie de Belfort-Montbeliard, Belfort-Montbeliard (Frankreich), Dissertation, 2012.

[Wang und Lee, 2005] Wang, H. und Lee, C.-Y.: Production and transport logistics scheduling with two transport mode choices. *Naval Research Logistics*, 52 (2005) 8, S.796-809.

[Wenger, 2010] Wenger, W.: Multikriterielle Tourenplanung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2010.

[Werner, 2013] Werner, H.: Supply Chain Management - Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 5. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2013.

[Werners, 2013] Werners, B.: Grundlagen des Operations Research. 3. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2013.

[Wiendahl, 2009] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage, Hanser Verlag, München u. a., 2009.

[Wiendahl und Lutz, 2002] Wiendahl, H.-P. und Lutz, S.: Production in networks. *Annals of the CIRP*, 51 (2002) 2, S.573-586.

[Wiendahl et al., 2006] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P. und Grabe, D.: Controlling in Lieferketten. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. 3. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2006.

[Wildemann, 1997] Wildemann, H.: Koordination von Unternehmensnetzwerken. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, (1997) 4, S.417-439.

[Wildemann, 2005] Wildemann, H.: Wertorientierte Supply Chain Collaboration. In: Eßig, M. (Hrsg.): Perspektiven des Supply Chain Management - Konzepte und Anwendungen. Springer, Berlin u. a., 2005.

[Woeginger, 1994] Woeginger, G. J.: Heuristics for parallel machine scheduling with delivery times. *Acta Informatica*, 31 (1994) 6, S.503-512.

[Woeginger, 1998] Woeginger, G. J.: A polynomial-time approximation scheme for single-machine sequencing with delivery times and sequence-indepent batch set-up times. *Journal of Scheduling*, 1 (1998) 2, S.79-87.

[Wu et al., 2000] Wu, J.; Cobzaru, M.; Ulieru, M. und Norrie, D. H.: SC-Web-CS: Supply chain web-centric systems. Proceedings of the IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing (ASC2000), Banff (Kanada), 2000. S.501-507.

[Yeung et al., 2011] Yeung, W.-K.; Choi, T.-M. und Cheng, T. C. E.: Supply chain scheduling and coordination with dual delivery modes and inventory storage cost. *International Journal of Production Economics*, 132 (2011) 2, S.223-229.

[Zäpfel und Braune, 2005] Zäpfel, G. und Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung. Verlag Franz Vahlen, München, 2005.

[Zäpfel und Wasner, 2000] Zäpfel, G. und Wasner, M.: Modellierung von Logistikketten und Möglichkeiten der Optimierung, gezeigt an einem Praxisfall der Stahllogistik. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 70 (2000) 3, S.267-287.

[Zdrzalka, 1991] Zdrzalka, S.: Approximation algorithms for single-machine sequencing with deliv-ery times and unit batch set-up times. *European Journal of Operational Research*, 51 (1991) 2, S.199-209.

[Zdrzalka, 1995] Zdrzalka, S.: Analysis of approximation algorithms for single-machine scheduling with delivery times and sequence independent batch setup times. *European Journal of Operational Research*, 80 (1995) 2, S.371-380.

[Ziegler, 2003] Ziegler, J.: Rechnerunterstützung für kooperative Arbeit - Computer supported cooperative work. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. und Westkämper, E. (Hrsg.): Neue

Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage, Springer, Berlin u. a., 2003.

[Zimmer, 2001] Zimmer, K.: Koordination im Supply Chain Management - Ein hierarchischer Ansatz zur Steuerung der unternehmensübergreifenden Planung. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2001.

[Zimmermann, 2008] Zimmermann, H.-J.: Operations Research - Methoden und Modelle 2. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008.

[Zimmermann und Stache, 2001] Zimmermann, W. und Stache, U.: Operations Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. 10. Auflage, Oldenbourg Verlag, München u. a., 2001.

Weiterhin sind in der vorliegenden Arbeit Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

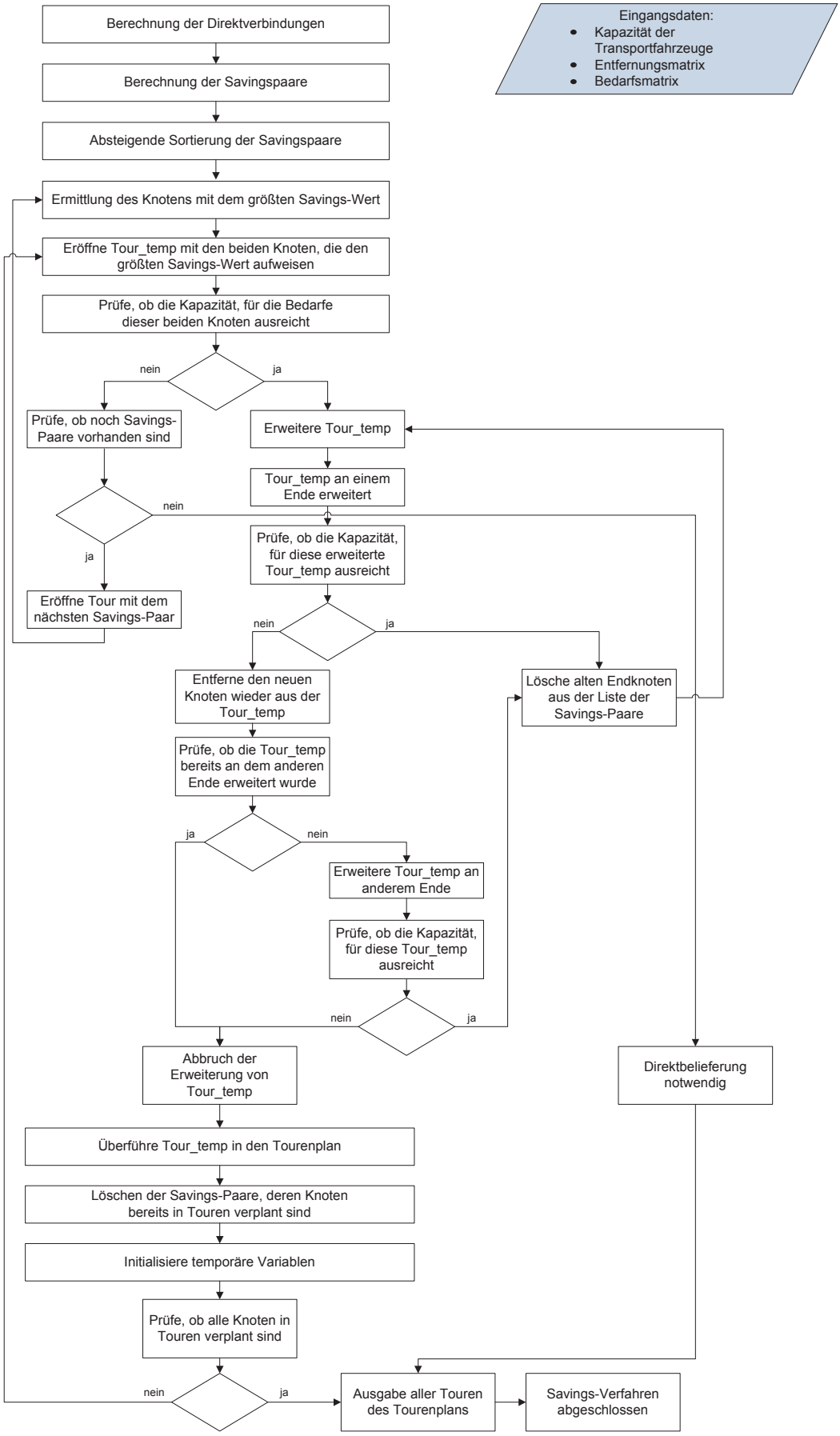
Möckl, Lutz: Simulationsbasierte Analyse zur Einführung eines unternehmensübergreifenden IT-Leitstands auf einem Automobilterminal. unveröffentlichte Diplomarbeit im Fachbereich 3 an der Universität Bremen, Gutachter: Prof. Dr. Hans-Jörg Kreowski und Prof. Bernd Scholz-Reiter, Betreuer: Dipl. Wirtsch.-Ing. Christian Meinecke, Dipl.-Inf. Jakub Piotrowski und Dipl.-Wi.-Ing. Carmen Ruthenbeck, 2009.

Pigorsch, Melanie: Vergleich von Tourenplanungsmethoden unter Verwendung logistischer Kennzahlen. unveröffentlichte Bachelorarbeit im Fachbereich 4 an der Universität Bremen, Gutachter: Prof. Bernd Scholz-Reiter und MBE Susanne Schukraft, Betreuer: Dipl. Wirtsch.-Ing. Christian Meinecke, 2011.

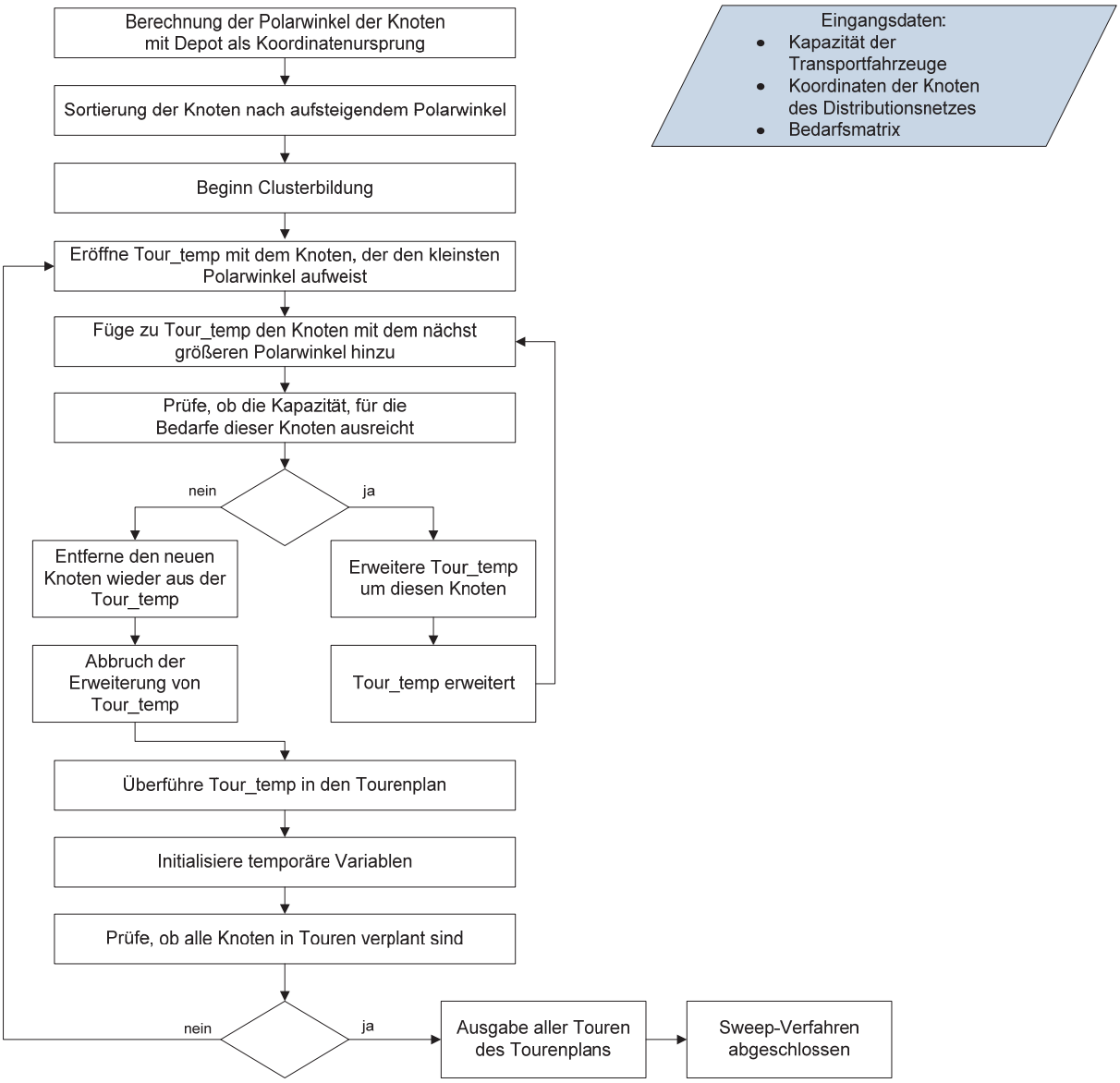
Selle, Janine: Exakte und heuristische Verfahren in der Maschinenbelegungsplanung in der Werkstattfertigung – Eine Untersuchung zum Stand der Technik. unveröffentlichte Studienarbeit im Fachbereich 4 an der Universität Bremen, Gutachter: Dipl. Wirtsch.-Ing. Christian Meinecke, 2011.

Selle, Janine: Leistungsvergleich von integrierten Produktions- und Transportplanungsverfahren auf Basis eines Simulationsmodells. unveröffentlichte Diplomarbeit im Fachbereich 4 an der Universität Bremen, Gutachter: Prof. Bernd Scholz-Reiter und Prof. Klaus-Dieter Thoben, Betreuer: Dipl. Wirtsch.-Ing. Christian Meinecke, 2012.

Anhang 1 - Ablaufdiagramm des sequenziellen Savings-Algorithmus



Anhang 2 - Ablaufdiagramm des Sweep-Verfahrens



Anhang 3 - Ausprägungen der Parameter von Produktionsplanungsmodellen

Modellparameter von Produktionsplanungsmodellen und deren Ausprägungen in Anlehnung an [Graham et al., 1979] und [Meinecke und Scholz-Reiter, 2014a]

Maschinenkonfiguration (α)

- Maschinenanordnung (α_1)

∘	eine Bearbeitungsmaschine (single machine)
P	Anzahl identischer und paralleler Maschinen (identical parallel machines)
Q	Anzahl gleicher und paralleler Maschinen (uniform parallel machines)
R	Anzahl paralleler Maschinen ohne Verbindung untereinander (unrelated parallel machines)
O	Open Shop Fertigungsorganisation
J	Job Shop Fertigungsorganisation

- Maschinenanzahl (α_2)

m	Anzahl konstanter Maschinen (mit $m \geq 1$)
∘	variable Maschinenanzahl

Auftragsparameter (β)

- Unterbrechung einer Auftragsbearbeitung (splitting) (β_1)

pmtn	Splitting erlaubt (preemption, splitting)
∘	Splitting nicht erlaubt (no splitting)

- Kapazitätsbeschränkung der Bearbeitungsmaschinen (β_2)

res	begrenzte Anzahl von s Ressourcen (s limited ressources)
res1	eine begrenzte Ressource (single limited ressource)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Prioritäten der Bearbeitungsaufträge (β_3)

prec	Berücksichtigung von Bearbeitungsreihenfolgen (precedence relation)
tree	Baumstruktur (rooted tree)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Einheitliches Freigabedatum der Bearbeitungsaufträge (β_4)

r_j	unterschiedliche Freigabedaten pro Auftrag (release dates differ)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt; Annahme: einheitliches Freigabedatum zum Zeitpunkt 0

- Obergrenze der Maschinenanzahl (β_5)

m_j	konstante obere Grenze der Maschinenanzahl mit $m_j \leq \overline{m}$
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Bearbeitungszeit der einzelnen Operationen (β_6)

$p_{ij=1}$	identische Bearbeitungszeit von 1 für alle Maschinen und alle Aufträge (unit processing time of 1)
p_{ij}	konstante obere und untere Grenze für Bearbeitungszeit mit $\underline{p} \leq p_{ij} \leq \overline{p}$
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Liefertermin (β_7)

jdd	auftragsspezifischer Liefertermin (job specific due date)
udd	einheitlicher Liefertermin (unified due date)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Maschinenverfügbarkeit (β_8)

de	deterministisch
sto	stochastisch
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Fixe Produktionskosten (β_9)

pprodfc	produktabhängige fixe Produktionskosten (product depending fixed costs of production)
nprodfc	produktunabhängige fixe Produktionskosten (non product depending fixed costs of production)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- variable Produktionskosten (β_{10})

pprodvc	produktabhängige variable Produktionskosten (product depending variable costs of production)
nprodvc	produktunabhängige variable Produktionskosten (non product depending variable costs of production)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Rüstkosten (β_{11})

sdsc	reihenfolgeabhängig (sequence depending set costs)
nsdsc	reihenfolgeunabhängig (non-sequence depending set costs)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Strafkosten für Verspätungen (β_{12})

pentd	abhängig von der Dauer der Verspätung (time depending penalty costs)
penu	pauschal und unabhängig von der Dauer der Verspätung (unified penalty costs)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

Anhang 4 - Ausprägungen der Parameter von Transportplanungsmodellen

Modellparameter von Transportplanungsmodellen und deren Ausprägungen in Anlehnung an [Eksioglu et al., 2009] und [Chen, 2010] sowie Änderungen und Erweiterungen nach [Meinecke und Scholz-Reiter, 2014a]

Netzwerk (NW)

- Anzahl der Knoten (NW1)

kn	bekannt (known)
pkn	teilweise bekannt (partially known)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Anzahl der Depots (NW2)

sdpt	ein Depot (single depot)
mdpt	mehrere Depots (multi depot)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Anzahl der Quellen (NW3)

ssrc	eine Quelle (single source)
msrc	mehrere Quellen (multi source)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Kantenorientierung (NW4)

dnw	gerichtetes Netzwerk (directed network)
unw	ungerichtetes Netzwerk (undirected network)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Anzahl der Distributionsebenen (NW5)

sldn	einstufiges Distributionsnetz (single level distribution network)
mldn	mehrstufiges Distributionsnetz (multi level distribution network)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

Szenario Parameter (SP)

- Aufteilung einer Sendung (splitting) (SP1)

spl	Splitting erlaubt (splitting)
nspl	Splitting nicht erlaubt (no splitting)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Zeitfenster (SP2)

twc	Zeitfenster bei den Kunden vorhanden (time windows customer)
twd	Zeitfenster bei den Depots vorhanden (time windows depot)
twcd	Zeitfenster bei Kunden und beim Depot vorhanden (time windows customer and depot)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Planungshorizont (SP3)

spp	eine Planungsperiode (single planning period)
mpp	mehrere Planungsperioden (multi planning period)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Anzahl der Transportmittel (SP4)

1	Anzahl verfügbarer Transportmittel gleich eins (vehicle count is 1)
vcd	definierte Anzahl verfügbarer Transportmittel (vehicle count is defined)
∞	unbegrenzte Anzahl (unlimited)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Kapazitätsbeschränkung der Transportmittel (SP5)

1	Kapazität jedes einzelnen Transportmittels gleich eins (unified capacity of transport vehicles is 1)
lctv	begrenzte Kapazitäten jedes einzelnen Transportmittels (limited capacity of transport vehicles)
∞	unbegrenzte Kapazitäten (unlimited capacity of transport vehicles)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Homogenität der Transportmittel (SP6)

iv	identische Transportmittel (identical vehicles)
niv	nicht identische Transportmittel (non-identical vehicles)
lsv	ladungsspezifische Transportmittel (load specific vehicles)
cv	kundenspezifische Transportmittel (costumer specific vehicles)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Auftragsgröße (SP7)

de	deterministisch
sto	stochastisch
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Wartezeiten (SP8)

de	deterministisch
sto	stochastisch
kwt	knotenabhängige Wartezeiten (knot specific waiting times)
vwt	transportmittelabhängige Wartezeiten (vehicle specific waiting times)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Transportzeiten (SP9)

de	deterministisch
sto	stochastisch
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Liefermethoden (SP10)

iid	Direktbelieferung jedes Knoten für jeden einzelnen Auftrag (individual and immediate delivery)
ibd	Direktbelieferung jedes Knotens mit Auftragsbündelung (individual and batch delivery)
rout	Belieferung im Zuge einer Tour (routing)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Fixe Transportkosten (SP11)

tftc	tourabhängige Fixkosten (tour specific fixed transportation costs)
dftc	entfernungsabhängige Fixkosten (distance specific fixed transportation costs)
vftc	transportmittelabhängige Fixkosten (vehicle specific fixed transportation costs)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Variable Transportkosten (SP12)

tvtc	tourabhängige variable Kosten (tour specific variable transportation costs)
dvtc	entfernungsabhängige variable Kosten (distance specific variable transportation costs)
vvtc	transportmittelabhängige variable Kosten (vehicle specific variable transportation costs)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Strafkosten für Verspätungen (SP13)

pentd	abhängig von der Dauer der Verspätung (time depending penalty costs)
penu	pauschal und unabhängig von der Dauer der Verspätung (uniform penalty costs)
⊙	unbekannt/nicht berücksichtigt

Anhang 5 - Ausprägungen der Parameter integrierter Planungsmodelle

Modellparameter integrierter Produktions- und Transportplanungsmodelle und deren Ausprägungen.
Die Ausprägungen der Modellparameter der Teilbereiche Produktion und Transport entsprechen den Angaben in Anhang 3 und Anhang 4. Um eine Wiederholung zu vermeiden werden an dieser Stelle nur die Ausprägungen der Modellparameter des Zwischenspeichers nach [Meinecke und Scholz-Reiter, 2014a] angegeben.

Parameter des Zwischenspeichers (TS)

- Kapazitätsbeschränkung des Zwischenspeichers (TS1)

lcts	begrenzte Kapazität (limited capacity of temporary storage)
∞	unbegrenzte Kapazität (unlimited capacity of temporary storage)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Beschränkung der Speicherdauer (TS2)

idlst	identische und begrenzte Speicherdauer (identical and limited storage time)
ilst	individuelle und begrenzte Speicherdauer (individual and limited storage time)
∞	unbegrenzte Speicherdauer (unlimited storage period)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

- Lagerkosten (TS3)

tsc	abhängig von Speicherdauer (time specific storage costs)
usc	abhängig von belegter Speicherkapazität (unit storage costs)
unisc	einheitlicher Speicherkostensatz (unified storage costs)
$\odot$	unbekannt/nicht berücksichtigt

Anhang 6 - Übersicht über die Ergebnisse der Simulationsstudie

	Push EDD		Push PT+WinQ+SL		Pull Savings		MSDI	
	Mittel-wert	Standard-fehler	Mittel-wert	Standard-fehler	Mittel-wert	Standard-fehler	Mittel-wert	Standard-fehler
Variante 1								
Auslastung 80%								
fixe Produktionskosten	37.010	4,63	37.010	4,63	37.010	4,63	37.010	4,63
Kosten der Warteschlangen	30.445	178,72	28.065	164,57	30.635	175,22	26.993	161,31
Kosten des Zwischenspeichers	22.585	44,04	22.556	46,72	22.515	34,29	20.921	33,32
Gesamtkosten der Produktion	53.378	180,32	50.821	161,76	72.046	764,35	59.654	607,57
Gesamtkosten des Transports	108.181	64,92	108.159	66,28	60.235	43,40	62.709	46,52
Gesamtkosten	198.569	194,76	195.989	177,27	169.291	754,64	159.374	600,33
Anzahl: bester Plan	4		48		39		909	
Mehrkosten ggü. MSDI in %	24,59%		22,97%		6,22%		-	
Variante 2								
Auslastung 85%								
fixe Produktionskosten	37.005	4,87	37.005	4,87	37.005	4,87	37.005	4,87
Kosten der Warteschlangen	30.484	180,64	28.056	165,55	30.637	173,78	26.903	161,28
Kosten des Zwischenspeichers	22.699	43,29	22.680	45,23	22.547	34,16	20.907	33,91
Gesamtkosten der Produktion	53.607	202,17	51.004	173,43	69.873	779,05	57.997	619,52
Gesamtkosten des Transports	108.075	66,22	108.139	66,22	60.210	44,19	62.687	48,11
Gesamtkosten	198.687	217,74	196.149	190,58	167.089	773,01	157.690	615,24
Anzahl: bester Plan	1		37		42		920	
Mehrkosten ggü. MSDI in %	26,00%		24,39%		5,96%		-	
Variante 3								
Auslastung 90%								
fixe Produktionskosten	37.000	4,69	37.000	4,69	37.000	4,69	37.000	4,69
Kosten der Warteschlangen	38.129	366,48	34.878	343,74	38.201	362,57	33.833	337,73
Kosten des Zwischenspeichers	20.965	37,22	20.909	38,98	22.849	36,09	21.308	34,60
Gesamtkosten der Produktion	59.905	409,46	56.316	368,01	87.042	1.133,19	72.079	917,39
Gesamtkosten des Transports	108.129	66,37	108.155	67,00	58.456	42,04	60.990	44,89
Gesamtkosten	205.034	415,32	201.471	374,79	182.499	1.125,20	170.069	908,84
Anzahl: bester Plan	3		90		55		852	
Mehrkosten ggü. MSDI in %	20,56%		18,46%		7,31%		-	
Variante 4								
Auslastung 95%								
fixe Produktionskosten	36.997	4,74	36.997	4,74	36.997	4,74	36.997	4,74
Kosten der Warteschlangen	53.731	717,30	49.261	683,30	54.045	719,05	48.763	688,78
Kosten des Zwischenspeichers	19.498	30,73	19.429	33,15	23.361	35,41	21.822	36,51
Gesamtkosten der Produktion	74.654	793,80	69.521	727,47	114.822	1.521,26	96.641	1.317,82
Gesamtkosten des Transports	108.135	65,01	108.163	66,41	56.773	39,03	59.476	42,45
Gesamtkosten	219.785	800,53	214.680	734,42	208.592	1.510,00	193.113	1.308,40
Anzahl: bester Plan	3		172		52		773	
Mehrkosten ggü. MSDI in %	13,81%		11,17%		8,02%		-	